INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | SEPTIEMBRE 2015 N.º 468 | MATERIA OSCURA COMPLEJA | EL TEOREMA ENORME | PLACAS SOLARES DE PEROVSKITA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Septiembre 2015 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

MATEMÁTICAS
El legado del teorema enorme

SALUD
Alteración de los ritmos circadianos

ENERGÍA
Placas solares de perovskita

LA CARA OCULTA DEL COSMOS

La materia oscura podría ser mucho más compleja de lo que se pensaba


9 770210 136004 00468

6,90 EUROS



INVESTIGACION
CIENCIA
SCIENTIFIC AMERICAN



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Recuperación de zonas húmedas
Física de los aislantes topológicos
Mosquitos que combaten el dengue
Las singularidades del cerebro adolescente
Unas redes neurales muy versátiles promueven la agilidad mental y la atracción por el riesgo

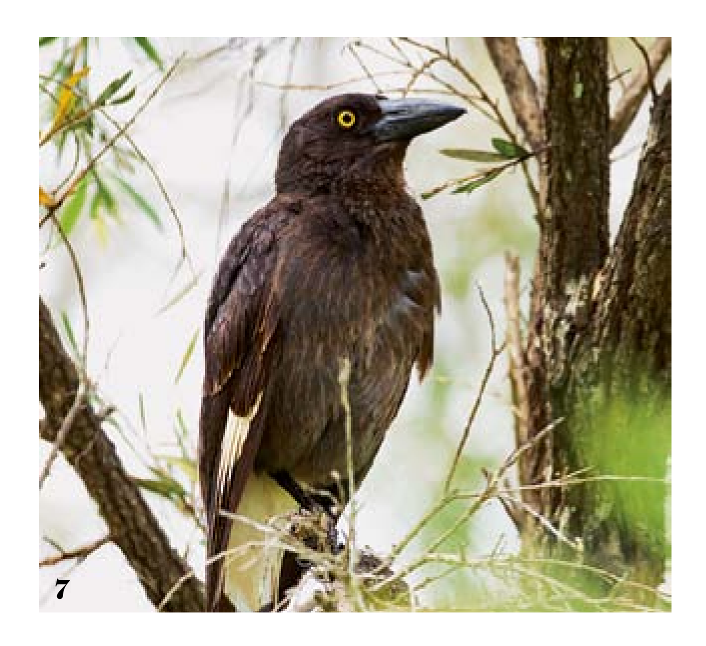


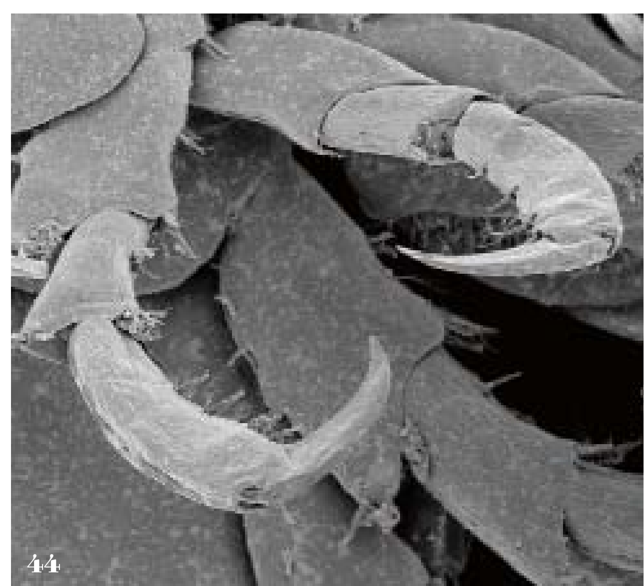
TIGACION
ENCIA
NEUROCIENCIA
Ciegos con visión inconsciente
ASTRONOMIA
Los neutrinos revelan fenómenos insondables
POTENTES



PETER RIGAUD

ARTÍCULOS


7


44


50

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

El universo abunda en materia oscura: una enigmática sustancia que no absorbe ni emite luz, pero cuya existencia puede inferirse a partir de los efectos gravitatorios que ejerce sobre las galaxias. Aunque la hipótesis más estudiada establece que esta exótica forma de materia se compone de un solo tipo de partícula, los físicos han comenzado a considerar la posibilidad de que incluya múltiples especies e incluso interacciones propias. Ilustración de Ron Miller.



redaccion@investigacionyciencia.es



Abril y junio 2015

COMBATIR EL ÉBOLA

El artículo «La batalla contra el ébola», de Helen Branswell [Investigación y Ciencia, abril de 2015], proporciona una excelente cobertura de la velocidad sin precedentes con que se han llevado a cabo los ensayos para obtener una vacuna contra la enfermedad. Sin embargo, no menciona un aspecto crítico: la pronta, activa y continuada implicación de las comunidades afectadas y sus líderes. Los ataques perpetrados contra instalaciones y personal sanitario, azuzados por rumores de que la propagación del virus era intencionada, demuestran que incluso los mejores propósitos pueden fracasar si la población local no colabora.

El compromiso de las comunidades será clave para continuar con los ensayos e introducir la vacuna en las regiones damnificadas. También ayudará a establecer una capacidad de respuesta local de cara al futuro, a fin de evitar que el próximo brote se convierta en crisis.

Meredith Minkler
Escuela de Salud Pública
Universidad de California en Berkeley
Frederick Marais
Departamento de Salud
Provincia Occidental del Cabo, Sudáfrica

He quedado estupefacta al leer que en las regiones afectadas por la epidemia de ébola se han realizado ensayos con placebo para poner a prueba la efectividad de la vacuna. Creo que algo así va más allá de lo inmoral. Nadie aceptaría semejante ruleta rusa si los participantes del estudio fuesen su familia o sus allegados.

Susan Russell
Boardman, Oregon

CURA ELÉCTRICA

El artículo de Kevin J. Tracey «Medicina bioelectrónica» [Investigación y Ciencia; junio de 2015] parece incurrir en una paradoja. Según el autor, cortar el nervio vago suprimía la fiebre causada por la molécula de señalización interleucina 1, presumiblemente como resultado de la liberación sistémica de la molécula inflamatoria factor de necrosis tumoral (TNF). Por un lado, cortar el nervio bloqueaba la liberación sistémica de TNF; sin embargo, al estimularlo también se reducía la liberación sistémica de TNF.

Lograr el mismo efecto que el que se produce al cortar el nervio vago parecería requerir una corriente inhibidora, no una de estimulación. ¿Puede ocurrir que, por algún motivo, dicha corriente incremente de manera selectiva solo el estímulo sensorial, y que ello reduzca de forma refleja la respuesta motora del nervio vago?

Harold Wilkinson
Departamento de neurocirugía
Hospital General de Massachusetts

Querría saber si Tracey ha considerado la posibilidad de que la acupuntura imite de algún modo el efecto de la estimulación eléctrica investigada por él. Aunque yo no la he usado, algunos conocidos míos aseguran haber obtenido resultados positivos; entre otras dolencias, para la migraña.

Evelyn McDonald
Fernandina Beach, Florida

Responde Tracey: *En efecto, las señales en el nervio vago pueden tanto aumentar como inhibir la inflamación. Dicho nervio incluye unas 100.000 fibras, las cuales intervienen en millones de efectos bioquímicos individuales. El reto al que se enfrenta la medicina bioelectrónica es el de enviar señales específicas que tengan como blanco circuitos concretos. Nuestros resultados indican que, en roedores, la inflamación puede suprimirse actuando sobre el 5 por ciento de las fibras del nervio vago.*

Hay un interés creciente entre la comunidad científica y médica sobre la relación entre la acupuntura y el control de la inflamación. La cuestión está siendo investigada por varios laboratorios. Por ejemplo, un estudio reciente publicado por Luis Ulloa, de la Escuela de Medicina de la Universidad Rutgers, sugiere que la estimulación eléctrica de cierto punto acupuntural situado en la pierna inhibe la inflamación debido a la activación de señales del nervio vago que acaba afectando a la glándula suprarrenal.

Errata corrige

En el artículo **Más allá de la ley de Moore** [por John Pavlus; Investigación y Ciencia, julio de 2015], después del epígrafe «Más allá del silicio» se afirma que «reducir a la mitad el tamaño de un transistor implica duplicar el rendimiento computacional con el mismo coste». En su lugar, debería leerse: «Duplicar el número de transistores en un chip implica aumentar el rendimiento computacional con el mismo coste».

En la última página del artículo **Un cohete para llegar a Marte** [por David H. Freedman; Investigación y Ciencia, agosto de 2015] se habla de «la explosión de un prototipo construido por Virgin Galactic». En realidad, el accidente al que hace referencia la frase ocurrió al estrellarse una nave de dicha compañía durante un vuelo de prueba.

Estos errores han sido corregidos en las ediciones digitales de los artículos correspondientes.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

AGRICULTURA

Invernaderos submarinos

El pasillo de hortalizas del supermercado se sumerge en el mar como nueva técnica de cultivo

A siete metros bajo las aguas del mar Mediterráneo crece un huerto experimental en burbujas transparentes de plástico. Las fresas, la albahaca, las judías y los tomates prosperan en el interior de esas biosferas llenas de aire, su nuevo hogar sumergido. El agua circundante aporta la temperatura y la humedad constantes tan difíciles de conseguir en tierra firme, mientras el agua dulce resbala y cae por el interior de las esferas una vez que el agua marina situada debajo se evapora y se condensa. Estos invernaderos marinos, situados en la costa de Italia, suponen una incursión en el cultivo submarino de Ocean Reef Group, una empresa dedicada al buceo y los equipos de submarinismo. Su presidente, Sergio Gamberini, decidió optar por el cultivo hidropónico tras comprobar en un ensayo preliminar que el suelo traía consigo plagas dañinas. Espera introducir esta modalidad de cultivo en países en vías de desarrollo costeros cuyas tierras son áridas. De hecho, ha recibido peticiones de biosferas desde países tan diversos como Maldivas y Arabia Saudita. Su hijo, Luca Gamberini, admite que queda mucho camino por recorrer: «A gran escala, nuestro sueño es utópico».

—Sabrina Imbler





LA TEMPERATURA DEL AIRE en el interior de los invernaderos submarinos ronda unos cálidos 29 grados, con una humedad del 90,5 por ciento.

OLIVIER MORIN, GETTY IMAGES (*arriba y centro*); CORTESÍA DE SERGIO GAMBERINI (*abajo*)

ASTRONOMÍA

Hurto solar

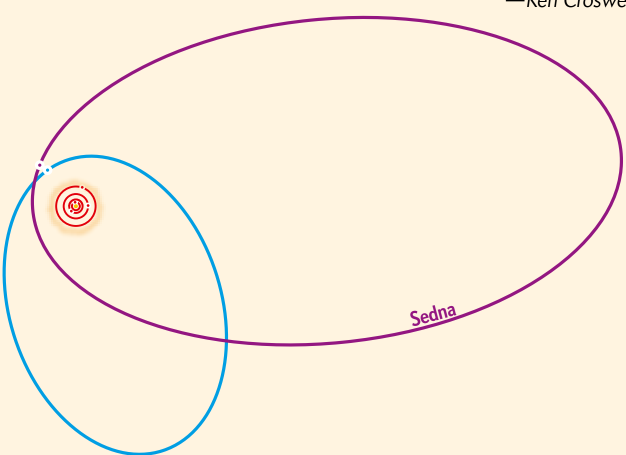
El Sol quizá le haya quitado Sedna a una estrella cercana

En los días de su descubrimiento, en 2003, Sedna era el cuerpo más lejano visto en nuestro club planetario. Su peculiar trayectoria —nunca se aventura cerca de los planetas gigantes— da a entender una historia no menos singular. ¿Cómo llegó allá? Puede que el Sol le arrancase Sedna a otra estrella, según nuevas simulaciones por ordenador.

Se encontró una pista acerca del pasado de Sedna en 2012, cuando se dio con un segundo objeto, más pequeño aún, cuya órbita era también oblonga y remota. Los astrónomos Lucie Jílková y Simon Portegies Zwart, del Observatorio de Leiden, y sus colaboradores investigaron si un atraco interestelar pudo crear las órbitas de Sedna y de su compañero de viaje 2012 VP113. «Vimos que era posible», comenta Jílková. Además, los investigadores reconstruyeron la escena del crimen e incluso las probables características de la estrella víctima, a la que llamaron «estrella Q». En un trabajo remitido a *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, afirman que la estrella Q debía de tener originalmente una masa un 80 por ciento mayor que la del Sol. Habría pasado a 34.000 millones de kilómetros de nosotros, distancia solo 7,5 veces mayor que la que hay entre el Sol y Neptuno. Esta proximidad significaría que nació en el mismo grupo o cúmulo que el Sol. Todavía existiría, pero su más ardiente luz se habría extinguido hace mucho, por su gran masa. Costaría encontrarla, porque hoy no sería más que una débil enana blanca.

Esta nueva investigación «es una defensa bastante convincente» de la hipótesis de que Sedna fue raptado, según el astrónomo Scott Kenyon, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. En cambio, el descubridor de Sedna, Mike Brown, del Instituto de Tecnología de California, mantiene que lo más probable es que naciese en el sistema solar y la fuerza gravitatoria de los hijos del Sol lo empujase hacia fuera, una situación más sencilla. El problema quizá no se podrá resolver hasta que no se hallen en los confines exteriores del sistema solar más objetos con órbitas extrañas. «Cuando tengamos alrededor de una docena, creo que podremos saberlo», dice Brown. Si el Sol hubiese robado estos objetos a la estrella Q, todos ellos tendrían que alcanzar su mayor proximidad a la Tierra al mismo lado del Sol. Pero si sus órbitas difiriesen, el Sol sería inocente del supuesto rapto.

—Ken Croswell



SEDNA (*púrpura*) y 2012 VP113 (*azul*) no se acercan nunca a las órbitas de los cuatro planetas gigantes (*rojo*), ni siquiera al hogar de Plutón en el cinturón de Edgeworth-Kuiper (*naranja*).



FUENTE: SCOTT S. SHEPPARD, INSTITUCIÓN CARNEGIE PARA LA CIENCIA (*datos*); AMANDA MONTANEZ (*gráfico*); THOMAS FUCHS (*ilustración*)

PSICOLOGÍA

Detector de mentiras colaborativo

Los grupos pillan los embustes más a menudo que los individuos

Al embustero lo delatan en el cine negro clásico una mirada huidiza, un no estarse quieto, unas manos sudorosas. En la vida real, sin embargo, sorprende lo difícil que es apercibirse de que alguien está contando una patraña. El porcentaje de aciertos en detectar mentiras, incluso cuando lo intentan profesionales formados, apenas supera el que se obtiene por pura suerte. Y los tribunales suelen rechazar el polígrafo como prueba porque los exámenes que se efectúan con ellos carecen de preguntas estandarizadas que determinen si se está diciendo una falsedad. Unos psicólogos de la Universidad de Chicago han visto que, a la hora de descubrir invenciones, los grupos de personas son regularmente más fiables que el azar o que un juez individual.

En su estudio se mostraba a los participantes declaraciones grabadas en vídeo, a solas o con otros, y se les pedía que conjeturasen si los declarantes decían la verdad o una mentira inocente. Tras 36 rondas, los investigadores observaron que los grupos de evaluadores puntuaban como los individuos al reconocer la veracidad de lo dicho, pero atinaban un 8,5 por ciento más al desvelar mentiras. Los grupos de tres o de seis eran fiables por igual en la detección de falsedades. Esa pequeña ventaja se debe a las ideas que surgen en las conversaciones, dice Nadav Klein, uno de los autores del estudio. Al hablar con otros de lo que se ha observado, se adquieren nuevas perspectivas que mejoran la comprensión. Los resultados se publicaron en junio en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

La balanza de la justicia se podría recalibrar consiguientemente. Por ejemplo, los jueces podrían ordenar de forma explícita a los miembros del jurado no solo que tomen en cuenta las pruebas de modo objetivo, sino que evalúen la sinceridad de los testigos, añade R. Scott Tindale, psicólogo de la Universidad Loyola Chicago. Con esa prescripción sería más probable que en las deliberaciones se discutiese la credibilidad y se venciera, pues, al engaño. Nadie aboga por una mentalidad de turba; pero cuando se sopesa la mendacidad parece que es de sabios intercambiar opiniones.

—Kat Long

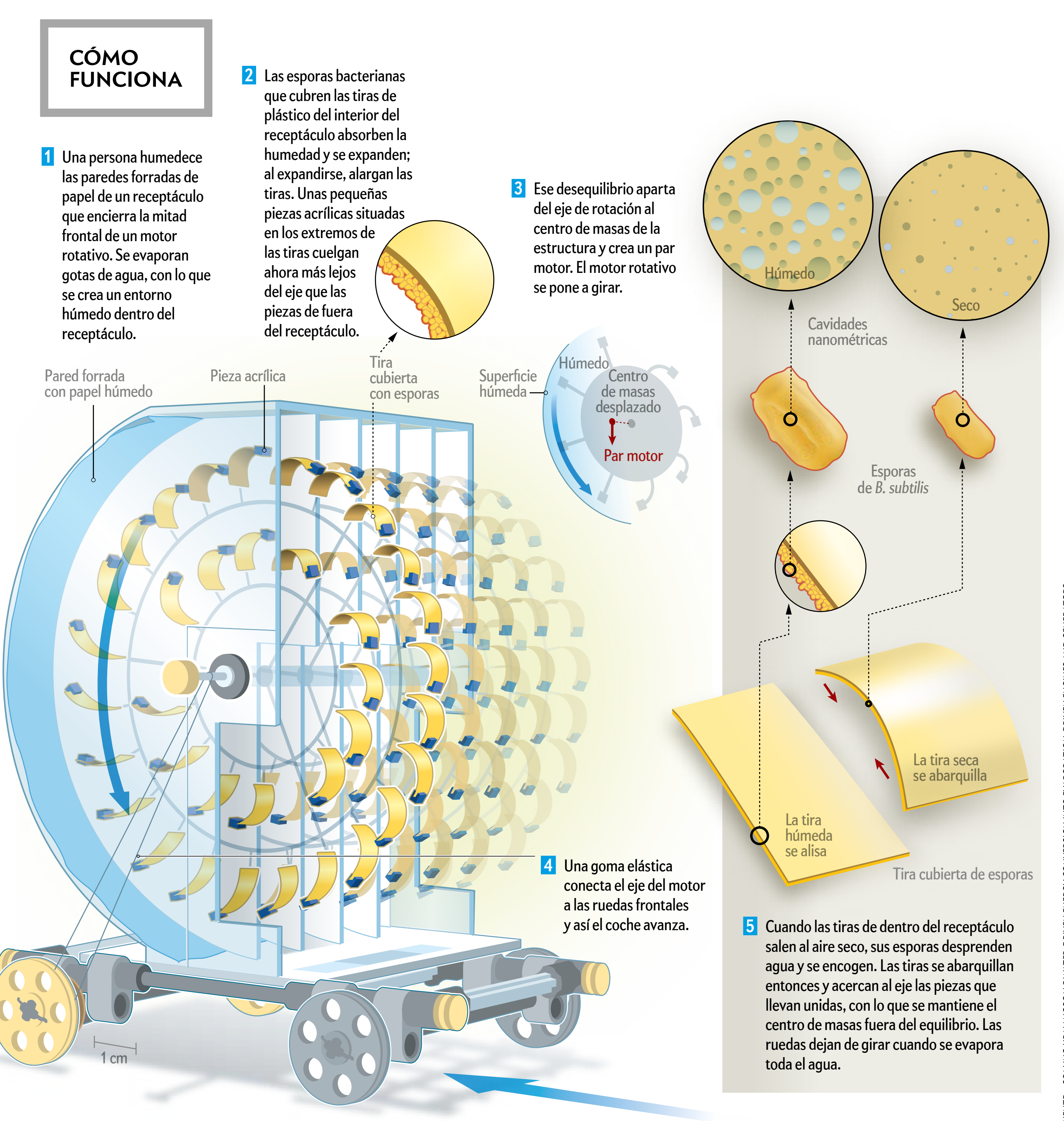
INGENIERÍA

La fuerza mecánica de la evaporación

Un coche de juguete se mueve gracias a la energía de la transformación del agua en vapor

El primer vehículo movido por la evaporación está correteando estos días por una mesa de laboratorio de la Universidad de Columbia. Pesa cien gramos y lo impulsan unas tiras, recubiertas de esporas, que, según van pasando por entornos de humedad diferente, se expanden y contraen como pequeños músculos. De momento puede llevarle diez minutos recorrer una mesa, pero los biólogos, químicos e ingenieros del proyecto creen que con mejoras el motor podría dar energía a una gama muy variada de artilugios, entre ellos sistemas robóticos y generadores. Por ahora no van a lo grande: otro prototipo alimenta dos diminutas luces de ledes.

—*Maria Temming*



FUENTE: «SCALING UP NANOSCALE WATER-DRIVEN ENERGY CONVERSION INTO EVAPORATION-DRIVEN ENGINES AND GENERATORS», POR XI CHEN ET AL., EN *NATURE COMMUNICATIONS*, VOL. 6, ART. NÚM. 7346; 16 DE JUNIO DE 2015; 5W INFOGRAPHICS (*ilustración*)

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Mimetismo vocal

Un pájaro de siete gramos ahuyenta con el aullido del lobo a un depredador 40 veces mayor que él

En el cuento tradicional, un muchacho trama burlarse de sus vecinos haciéndoles creer que un lobo merodea cerca de la aldea. Este relato con moraleja acaba mal para el travieso, pero una pequeña ave australiana sabe hacerlo mejor. Si un verdugo pío amenaza un nido con polluelos de acantiza parda, los progenitores cantan a voz en grito ¡que viene el lobo!, en realidad, el azor. La falsa alarma amedrenta al intruso porque cree que su más temido enemigo, el azor australiano, anda próximo. La diminuta acantiza engaña así a su depredador.

Para estudiar esta refinada artimaña, el biólogo Branislav Igic, entonces en la Universidad Nacional Australiana, y sus colaboradores colocaron un verdugo disecado cerca de nidos de acantizas y emitieron los reclamos de alarma de los polluelos. Las acantizas adultas prorrumpieron en gritos de peligro e incluso imitaron los cantos de otras especies. Igic también puso a prueba a 18 verdugos mediante la emisión de sonidos de alarma por azor que eran fieles y no tanto a los reclamos de las acantizas. Comprobó que los segundos también eran disuasorios. Los resultados se publicaron la pasada primavera en *Proceedings of the Royal Society B*.

Los investigadores creen que los cantos que parecen proceder de varios individuos dan mayores visos de realismo a la alarma. «Las aves adoptan estrategias singulares sumamente interesantes para proteger a su prole», explica Igic, que ahora se encuentra en la Universidad de Akron. Los cantos de las acantizas distrajeron a los verdugos un promedio de 8,3 segundos, pero cuando Igic incluyó también los reclamos fieles, los verdugos permanecieron intimidados el doble de tiempo. Ese lapso adicional puede bastar para que los polluelos huyan del nido.

El camuflaje visual, ejemplificado por las inofensivas serpientes reales que semejan las venenosas serpientes de coral, es un viejo conocido de los etólogos, pero el mimetismo vocal sigue deparando muchas sorpresas. «Esta es otra prueba de las ventajas que otorgan algunas imitaciones vocales gracias a un comportamiento vocal inusual», afirma Tom Flower, ornitólogo de la Universidad de Ciudad del Cabo que no participó en el estudio. A él le gustaría saber con certeza si la farsa mejora la supervivencia de los polluelos. Por ahora, a diferencia de los aldeanos de la fábula, el verdugo aún no ha descubierto el engaño de la acantiza.

—Jason G. Goldman



EL VERDUGO PÍO es temible pero no está exento de enemigos.

B. G. THOMPSON, SCIENCE SOURCE (*verdugo pío*); M.ª INMACULADA SÁNCHEZ VICENTE, UNIVERSIDAD DE SALAMANCA (*microscopía*)

AGENDA

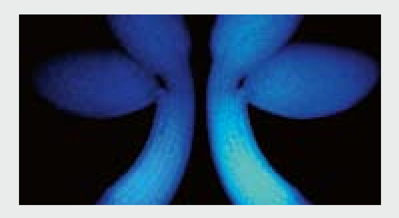
CONFERENCIAS

2 de septiembre
Luz y visión: Entendiendo y corrigiendo la presbicia
Susana Marcos, Instituto de Óptica del CSIC
XI Reunión Anual de Óptica
Universidad de Salamanca
http://rno11.usal.es/dia-de-la-luz

29 de septiembre
Alzhéimer. Lanzaderas-ambulancia para curar el cerebro
Ernest Giralt, Instituto de Investigación Biomédica de Barcelona
Ciclo «Ciencia de hoy para la medicina del mañana»
Centro de Cultura Contemporánea de Barcelona
www.cccb.org/es/actividades

EXPOSICIONES

III Certamen de Fotografía Científica
Instituto Hispanoluso de Investigaciones Agrarias
Parque Científico de Salamanca
http://culturacientifica.usal.es/home



Fauna del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es

OTROS

9 de septiembre - Mesa redonda
Mujeres en la ciencia: Superando los retos de género en ciencia
Museo de las Ciencias Príncipe Felipe
Valencia
www.cac.es/museo/actividades

Del 9 al 12 de septiembre - Curso
***Einstein on the beach:* 1915-2015, 100 años de relatividad general**
Universidad Internacional del Mar
Águilas (Murcia)
www.um.es/unimar

16 de septiembre - Café científico
La complejidad abordada por el supercomputador Marenostrum
Mateo Valero, Centro de Supercomputación de Barcelona
Casa Orlandai, Barcelona
www.cienciaensocietat.org

ASTROFÍSICA

¿Explotará el Sol cuando muera?

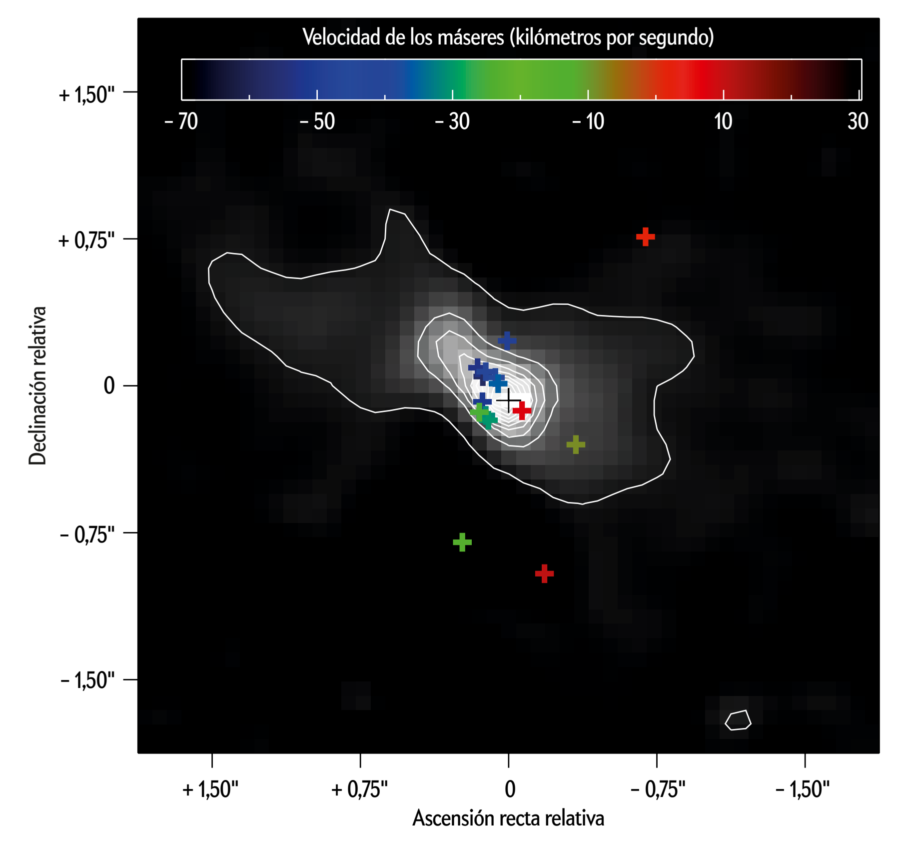
La detección de una emisión explosiva durante la formación de una nebulosa planetaria revela un fenómeno hasta ahora desconocido en las fases finales de las estrellas similares al Sol

OLGA SUÁREZ Y JOSÉ FRANCISCO GÓMEZ

Una de las etapas más críticas en la evolución de las estrellas como el Sol tiene lugar hacia el final de su vida, cuando se convierten en nebulosas planetarias. Antes de que eso ocurra, la estrella expulsa hacia el exterior gran parte de su material, el cual forma una envoltura nebulosa alrededor del núcleo. Cuando el astro se convierte en nebulosa planetaria, se producen varios cambios de gran importancia. Por un lado, la temperatura del núcleo aumenta y, al llegar a los 25.000 grados, la luz que emana del astro «rompe» los átomos de la envoltura mediante procesos de fotoionización. Por otro, la nebulosa circundante pierde su simetría esférica inicial, lo que da lugar a estructuras bipolares, multipolares o asimétricas.

Sin embargo, los detalles de dicho proceso siguen sin conocerse con exactitud. La asimetría observada en las nebulosas planetarias parece deberse principalmente a los chorros de materia emitidos por la estrella central. Al chocar contra la envoltura, los chorros la deforman y abren cavidades que serán iluminadas por el núcleo del astro. La generación de estos chorros ocurre, sobre todo, durante la etapa inmediatamente anterior a la de nebulosa planetaria, llamada fase «post rama asintótica gigante», o fase post-AGB, por sus siglas en inglés (las siglas AGB designan un período posterior a la conversión de la estrella en una gigante roja). Así pues, para estudiar la ruptura de la simetría esférica en las nebulosas planetarias, deberíamos centrarnos en aquellos astros que se encuentran emitiendo los primeros chorros de materia.

Hace poco nuestro grupo descubrió IRAS 15103-5754, una estrella que acaba de entrar en la fase de nebulosa planetaria. Al estudiarla en detalle, hemos observado que el comienzo de dicha etapa ha coincidido con la eyección explosiva de un chorro bipolar de materia, el cual parece estar modelando la envoltura del astro, inicialmente esférica. Hasta ahora, esta clase de eventos explosivos no se habían observado en estrellas similares al Sol. De hecho, IRAS 15103-5754 parece constituir el eslabón perdido que faltaba por identificar en la cadena de sucesos que conducen a la formación de una nebulosa planetaria.



TRAZADORES ESTELARES: La emisión estimulada de ondas de radio (emisión máser) por parte de ciertas moléculas permite caracterizar los chorros de materia eyectados por estrellas moribundas. Sobre esta imagen en blanco y negro de la nebulosa planetaria IRAS 15103-5754 se han superpuesto las posiciones de los máseres de agua detectados con la batería australiana de radiotelescopios ATCA. El código de colores indica su velocidad, calculada a partir del efecto Doppler. Los máseres en azul marcan el chorro de materia que está modelando la envoltura de la nebulosa. El patrón de velocidades observado, con los máseres más veloces situados en posiciones más alejadas, indica la existencia de un evento explosivo.

DE: «A MID-INFRARED IMAGING CATALOGUE OF POST-ASYMPTOTIC GIANT BRANCH STARS», E. LAGADEC ET AL. EN *MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY*, VOL. 417, N.° 1, OCTUBRE DE 2011/VLT/ESO (*IRAS 15103-5754*) Y «THE FIRST "WATER FOUNTAIN" COLLIMATED OUTFLOW IN A PLANETARY NEBULA», J. F. GÓMEZ ET AL. EN *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOL. 799, N.° 2, ENERO DE 2015/ATCA/CSIRO (*máseres*)

Máseres y fuentes de agua

Un fenómeno físico que permite analizar los chorros de materia expulsados por una estrella es su radiación máser. Esta corresponde a la emisión estimulada de ondas de radio; es decir, el mismo proceso que tiene lugar en un láser, solo que con ondas de radio en vez de con luz visible. La emisión máser produce una radiación muy intensa y localizada, la cual aparece en las imágenes en forma de «puntos» brillantes.

Las observaciones con radiotelescopios permiten localizar la zona exacta de

la estrella donde se produce dicha emisión. Dado que la radiación máser de cada especie molecular tiene lugar a una frecuencia determinada, toda variación en la velocidad del gas emisor producirá, por efecto Doppler, un cambio en la frecuencia observada desde la Tierra. Ello permite deducir la velocidad del gas con respecto a nosotros, lo que convierte a la emisión máser en una herramienta ideal para estudiar la posición y la velocidad del gas emitido por una estrella.

Ciertas moléculas, como el agua, emiten radiación máser en las zonas de choque y justo en las condiciones de temperatura y densidad que existen en las envolturas de las estrellas evolucionadas. Ello sitúa a los máseres de agua como trazadores clave para estudiar las primeras expulsiones de chorros de materia en las estrellas post-AGB.

Los objetos en los que se han observado máseres con velocidades del orden de 100 kilómetros por segundo han sido bautizados como «fuentes de agua». Hasta el momento solo se conocen 13 estrellas de este tipo. Su estudio ha permitido datar la edad de los chorros entre 5 y 100 años, una escala de tiempo muy corta en términos astrofísicos. Ello indica que las fuentes de agua corresponden a las primeras manifestaciones de asimetría en las estrellas evolucionadas.

Todas las fuentes de agua conocidas con anterioridad a nuestro trabajo se encontraban en estrellas de la fase post-AGB; es decir, en astros que aún no habían alcanzado la temperatura suficiente para ionizar su envoltura. También se habían detectado máseres de agua en cuatro nebulosas planetarias, pero en tales casos la zona de emisión mostraba velocidades bajas y no trazaba chorros de materia. Faltaba un eslabón perdido entre estos dos tipos de objetos: las fuentes de agua en la etapa post-AGB y las nebulosas planetarias con máseres de agua.

Las respuestas de IRAS 15103-5754

El descubrimiento de dicho eslabón vino de la mano de la nebulosa planetaria IRAS 15103-5754, cuyos máseres de agua fueron detectados por nuestro equipo en 2007 con el radiotelescopio australiano de Parkes. Las características del astro correspondían a las de una nebulosa planetaria, pero los máseres mostraban componentes con una velocidad muy elevada, de unos 75 kilómetros por segundo. Tales propiedades sugerían que nos hallábamos ante la primera nebulosa planetaria que era, al mismo tiempo, una fuente de agua.

Confirmar dicha hipótesis requería estudiar el objeto con un interferómetro; es decir, con un radiotelescopio compuesto por varias antenas. Esta técnica permite aumentar la resolución espacial de las observaciones, gracias a lo cual podríamos saber si toda la emisión máser detectada con el radiotelescopio de Parkes procedía realmente de IRAS 15103-5754. En general, las observaciones con una única antena solo indican que la emisión máser procede de una región celeste relativamente cercana a la estrella, pero no permiten asociarla sin ambigüedades al astro.

En agosto de 2011 efectuamos las primeras observaciones interferométricas de los máseres asociados a IRAS 15103-5754 con la batería de radiotelescopios ATCA, también en Australia. Aquellas primeras mediciones se vieron confirmadas por nuevas observaciones realizadas en octubre de 2012. La comparación de estos datos con las imágenes en el infrarrojo nos permitió confirmar que la emisión máser procedía, en efecto, de la nebulosa planetaria.

El análisis de los máseres de IRAS 15103-5754 reveló un interesante patrón de velocidades. En particular, vimos que los máseres con velocidades más elevadas se encontraban más lejos de la estrella central que el resto. Dicha distribución se conoce con el nombre de «flujo de Hubble» y constituye un claro indicio de un evento explosivo. Los máseres de las fuentes de agua «clásicas» (aquellos que aparecen en estrellas post-AGB), en cambio, no muestran dichas características. En ellos, la distribución de velocidades parece corresponder a la de un chorro continuo de materia.

Esa diferencia en la modalidad de eyección de materia sugiere que el evento explosivo detectado en IRAS 15103-5754 marca el momento en que una estrella comienza la fase de nebulosa planetaria. Si bien en otras nebulosas se habían observado indicios de explosiones, hasta ahora se ignoraba el instante en que se habían producido. Nuestro trabajo ha permitido relacionar por primera vez esta clase de eyecciones explosivas con el nacimiento de la nebulosa planetaria.

Finales explosivos

Cabe preguntarse si nuestro Sol, una estrella con características similares a las de IRAS 15103-5754, sufrirá el mismo final explosivo cuando, dentro de unos 7500 millones de años, se convierta en una nebulosa planetaria.

Resulta interesante comparar la muerte de IRAS 15103-5754 con lo que ocurre en las estrellas más masivas. Los astros con una masa superior a unas ocho veces la del Sol explotan en forma de supernova. En estos objetos, la explosión provoca la expulsión de casi la totalidad de la masa estelar y su luminosidad puede alcanzar 10.000 millones de veces la del Sol. En el caso del Sol, si al final de su vida sufre una explosión del tipo de la observada en IRAS 15103-5754, un observador lejano no vería aumentar demasiado su brillo, pero sí comprobaría cómo la nebulosa circundante sufre cambios considerables debido al chorro de materia expulsado.

Nuestras observaciones de IRAS 15103-5754 continuarán en los años venideros para seguir la evolución del chorro de materia. Este estudio a lo largo del tiempo nos permitirá comprobar si la emisión que hemos detectado constituye un fenómeno aislado o si, por el contrario, la entrada en la etapa de nebulosa planetaria se ve acompañada por más de una explosión.

—Olga Suárez
Observatorio de la Costa Azul
Niza
—José Francisco Gómez
Instituto de Astrofísica de Andalucía
CSIC
Granada

PARA SABER MÁS

A mid-infrared imaging catalogue of post-asymptotic giant branch stars. E. Lagadec et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 417, n.º 1, págs. 32-92, octubre de 2011. Disponible en **mnras.oxfordjournals.org/content/417/1/32.short**

The first «water fountain» collimated outflow in a planetary nebula. J. F. Gómez et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 799, n.º 2, pág. 186, enero de 2015. Disponible en **arxiv.org/abs/1412.2327**

EN NUESTRO ARCHIVO

La muerte de las estrellas comunes. Bruce Balick y Adam Frank en *IyC*, octubre de 2004.

CRONOBIOLOGÍA

La iluminación artificial desajusta nuestro reloj biológico

Confunde el sistema circadiano y causa cronodisrupción, una pérdida de sincronía con el ciclo de luz natural asociada a numerosas enfermedades. ¿Cómo podría paliarse este efecto?

JUAN ANTONIO MADRID PÉREZ

El sistema circadiano es el encargado de generar y sincronizar todos los ritmos circadianos, es decir, los que presentan un período de 24 horas. Funciona como una orquesta en la que cada músico toca en un momento preciso. El director es el núcleo supraquiasmático (NSQ), una pequeña estructura del hipotálamo que opera a modo de reloj cerebral central. Los músicos se agrupan en una suerte de relojes periféricos, alojados en todos los tejidos y órganos (hígado, corazón, páncreas, etcétera); se hallan sincronizados por las señales que les envía el director a través de la melatonina, el cortisol, la temperatura corporal y el sistema nervioso vegetativo. La actividad de estos relojes controla todos los ritmos de nuestro cuerpo.

Cada neurona del NSQ y cada célula de los relojes periféricos posee una maquinaria molecular formada por los genes *Bmal1*, *Clock*, *Per* (*Per1*, *Per2* y *Per3*) y *Cry* (*Cry1* y *Cry2*) con capacidad para generar ritmos de unas 24 horas (circadianos) en su actividad, induciendo además la expresión rítmica del diez por ciento del resto del genoma (genes controlados por el reloj, o CCG, por sus siglas en inglés). Si se somete a un organismo a un aislamiento total, estos ritmos persisten con un período ligeramente superior a las 24 horas, lo que pone de manifiesto su carácter endógeno.

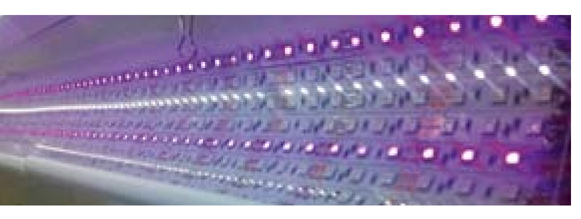
El director y los músicos siguen fielmente la «partitura» circadiana. El núcleo supraquiasmático ajusta constantemente su ritmo con la hora de la jornada y mantiene conexión directa con la retina, que le informa sobre la luminosidad del entorno. La luz llega al NSQ gracias a las células ganglionares retinianas, unas neuronas que producen un fotopigmento muy sensible a la luz azul (melanopsina) y que permiten una vía independiente de la visión consciente [*véase* «Un órgano oculto en los ojos», por Ignacio Provencio; Investigación y Ciencia, julio de 2011.] ¿Qué ocurre si la partitura se ve alterada?

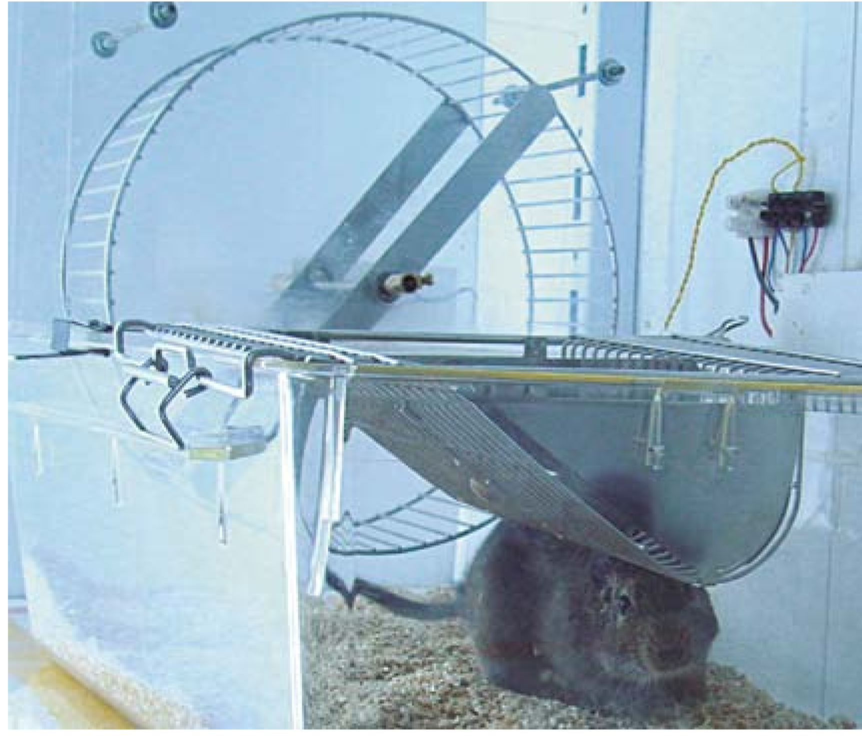


La importancia de la oscuridad

Tras millones de años de evolución de la vida en un ambiente donde día y noche se han sucedido con precisión, en apenas un siglo la luz artificial ha invadido la noche y avanza como una mancha de aceite borrando la oscuridad. Por la mañana, lo primero que hacemos después de apagar el despertador es darle al interruptor de una lámpara; cuando el sol se oculta, la misma luz ilumina nuestras últimas horas de trabajo y ocio antes de acostarnos.

Esos actos, en apariencia inofensivos, entrañan un coste en términos de salud. Al encender la luz cuando ya se ha puesto el sol, el NSQ interpreta que es de día, cuando en realidad es de noche; se comunica entonces con los diferentes órganos, incluida la glándula pineal, y les envía una información errónea, que les induce a realizar los ajustes fisiológicos propios de la actividad diurna. De este modo, los ritmos de nuestras células se desincronizan del ciclo ambiental natural, lo que genera algo parecido a un ruido molesto —siguiendo la metáfora musical—, o desajuste temporal, que se conoce como cronodisrupción.





UNAS JAULAS ESPECIALES permiten monitorizar el comportamiento de los degús en función de la iluminación. Se hallan provistas de una rueda giratoria conectada a un ordenador que registra en todo momento la actividad locomotora del roedor (cuando está despierto, suele correr casi todo el tiempo en la rueda), y se iluminan mediante un dispositivo de ledes monocromáticos (*arriba*) que controla la intensidad, el espectro y la duración de la luz.

BEATRIZ BAÑO Y M.ª ÁNGELES BONMATÍ, CRONOLAB

Los resultados de numerosos estudios experimentales y epidemiológicos no dejan lugar a dudas: la cronodisrupción se asocia a una mayor incidencia de patologías, entre ellas deterioro cognitivo, hipertensión, envejecimiento acelerado, diabetes, obesidad, depresión, inmunodepresión, infertilidad, insomnio y cáncer. Ello llevó en 2007 a la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer, de la Organización Mundial de la Salud, a considerar el trabajo a turnos que produce cronodisrupción como carcinógeno potencial.

Monitorización de los ritmos circadianos

A pesar de la importancia que la luz y el sistema circadiano tienen en la etiología de numerosas enfermedades, hasta hace poco no disponíamos de procedimientos para evaluar y tratar las alteraciones cronobiológicas como lo hacemos con la diabetes o la hipertensión. Por ello, en nuestro laboratorio de cronobiología (Cronolab) nos propusimos desarrollar herramientas para hacerlo posible.

No fue fácil. Para empezar, nuestro reloj biológico reside en el cerebro, por lo que solo puede ser abordado de forma indirecta, mediante el registro de parámetros cuyo ritmo de variación viene marcado por el reloj. Junto con M.ª Ángeles Rol, también del Cronolab, desarrollamos en 2010 una técnica denominada monitorización ambulatoria circadiana. Esta se basa en la medición simultánea de varios indicadores que aportan información complementaria sobre el sistema circadiano: en concreto, la temperatura de la piel, la actividad motora y la posición corporal (variables endógenas), y la luz ambiental (variable exógena).

Esta técnica ya se ha empleado en varios hospitales y centros de investigación para estudiar la cronobiología de distintas patologías (hipertensión, síndrome metabólico, autismo, trastornos del sueño, cáncer y deterioro congnitivo, entre otras).

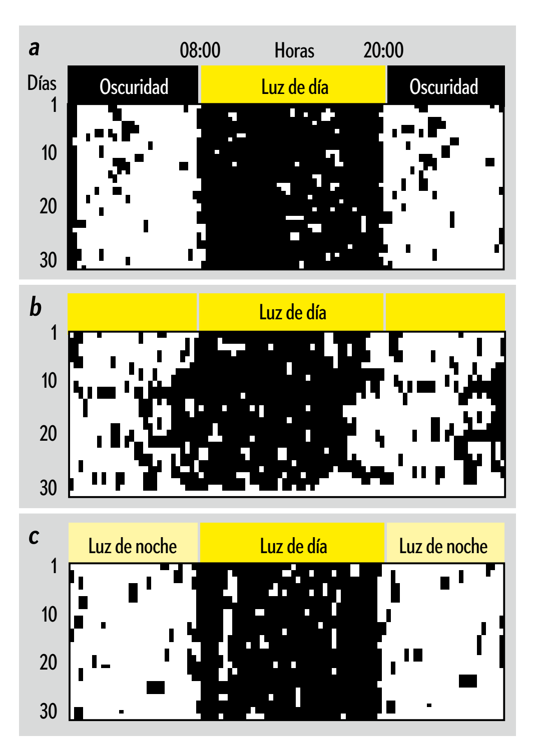
Además de ofrecer una forma de medir el funcionamiento del sistema circadiano, la monitorización ambulatoria circadiana ha resultado ser una técnica muy adecuada para estudiar el ritmo de sueño y vigilia. Así lo demostró nuestra estudiante de doctorado Elisabet Ortiz, ahora en el Hospital Paul Brouse de París, al comprobar que podía saber con precisión cuándo la persona dormía o se despertaba, a partir de la combinación de las variables temperatura, actividad y posición. Gracias a este hallazgo se desarrolló un reloj de muñeca (patentado y registrado con el nombre Kronowise®) que mide y registra de forma periódica estas y otras variables relacionadas con la luz infrarroja y visible; se utiliza para estudiar las ritmos biológicos de pacientes con trastornos del sueño (las mediciones suelen realizarse cada 30 segundos durante una semana).

La pérdida de contraste entre el día y la noche

El ritmo de vida actual conlleva una pérdida de contraste lumínico entre el día y la noche, debido a una insuficiencia de luz natural durante el día y un exceso de luz artificial por la noche. ¿Cómo nos afectan estos ciclos anómalos de luz y oscuridad?

Nuestros primeros experimentos sobre esa cuestión los llevamos a cabo con el degú (*Octodon degus*), un roedor originario de Chile, y con *Nothobranchius korthausae*, un pez africano. Ambos modelos animales son muy interesantes para los estudios cronobiológicos porque presentan visión en color y carácter diurno. Cuando sometíamos a los degús a cambios en el ciclo lumínico, simulando las condiciones en un turno de trabajo rotatorio, además de producirse cronodisrupción, aumentaban los indicadores de estrés oxidativo, una de las causas del envejecimiento. Descubrimos que era posible medir el grado de envejecimiento del sistema circadiano mediante el análisis de sus ritmos de actividad motora. En el caso del pez africano llegamos incluso a predecir la muerte natural de los animales con 20 días de antelación.

Asimismo, los ciclos de luz-oscuridad anómalos pueden causar un mayor desarrollo de tumores. En ratones, se ha observado que la luz continua durante día y noche induce cronodisrupción, a la par que acelera el desarrollo del melanoma. Y parece que el fenómeno afecta también a los humanos. En un estudio en pacientes con cáncer colorrectal, a los cuales se les aplicó la monitorización ambulatoria circadiana durante una semana, se halló cierta correlación: los pacientes con mayor índice de función circadiana (un índice de salud del sistema circadiano basado en la regularidad, amplitud y fragmentación de los ritmos) presentaban mayor tiempo de supervivencia.



EFECTOS DE LA LUZ sobre el reloj circadiano del degú (*Octodon degus*). Estas gráficas muestran los patrones de actividad (*zonas negras*) y reposo (*zonas blancas*) de un degú sometido a diferentes condiciones de iluminación en ciclos de 30 días. Cuando el roedor vive con un ciclo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad (*a*), su actividad motora se restringe básicamente al período de luz. Cuando se mantiene con la luz continuamente encendida (*b*), en cambio, sus ritmos se desincronizan y su actividad se fragmenta y distribuye más irregularmente a lo largo de las 24 horas. Esto no ocurre si alternamos dos tipos de luz, una enriquecida en azul («luz de día») y la otra carente de azul («luz de noche») (*c*); en esta situación, el degú deja de hacer ejercicio cuando se le enciende la «luz de noche», mientras que se despierta y se mantiene activo con la «luz de día».

BEATRIZ BAÑO Y M.ª ÁNGELES BONMATÍ, CRONOLAB

Luz noctura «saludable»

Nuestro ritmo de vida necesita que iluminemos la noche. Sin embargo, nuestro sistema circadiano preferiría que, cuando el sol se pone, reinara la oscuridad. ¿Es posible hacer compatibles estas dos necesidades? En Cronolab nos propusimos desarrollar una fuente de luz que permitiera alumbrar la noche pero que fuera prácticamente «invisible» para nuestro sistema circadiano.

Para determinar si una luz es más o menos activa sobre el sistema circadiano utilizamos dos parámetros: el grado de inhibición de la melatonina por la luz (la melatonina es la

señal química de la oscuridad) y el reflejo de contracción de la pupila en respuesta a la iluminación del ojo (que se mide mediante pupilometría). Los trabajos de M.ª Ángeles Bonmatí han demostrado que la luz de entre 460 y 480 nanómetros (en la banda azul del espectro) es la que más activa el sistema circadiano. Una luz nocturna debería, por tanto, evitar esta longitud de onda.

La versatilidad que ofrecen los ledes monocromáticos nos ha permitido diseñar y patentar un dispositivo de iluminación circadiana «saludable», que opera día y noche mediante la misma fuente de luz. La configuración «luz de día» (LD) es rica en azul, mientras que la «luz de noche» (LN) carece de este color. Para comprobar su eficacia, intentamos sincronizar los ritmos de los degús mediante un ciclo lumínico en el que LD y LN se alternaban cada 12 horas. Los resultados fueron claros: los roedores dormían solo durante la falsa noche (iluminación en modo LN) y se despertaban durante el falso día (iluminación en modo LD); además, respondieron a un adelanto o retraso del ciclo LD-LN con cambios en el mismo sentido de sus ritmos de actividad motora. Sorprendentemente, el cerebro del degú interpretaba nuestra luz nocturna igual que la oscuridad.

El siguiente paso será desarrollar una luz circadiana para los trabajadores nocturnos y que cumpla tres condiciones: que sea segura para el ojo humano, que no inhiba la producción natural de melatonina y que no afecte negativamente a la seguridad y rendimiento de los trabajadores.

Debemos recordar, con Julio Cortázar, que «el tiempo entra por los ojos», y son la luz y la oscuridad las que ponen en hora y dan cuerda a nuestros relojes.

—Juan Antonio Madrid Pérez
Laboratorio de cronobiología
Universidad de Murcia

PARA SABER MÁS

Day-night contrast as source of health for the human circadian system. A. Martínez Nicolás et al. en *Chronobiology International*, vol. 31, n.º 3, págs. 382-393, abril de 2014.
Protecting the melatonin rhythm through circadian healthy light exposure. M. A. Bonmati Carrion et al. en *International Journal of Molecular Sciences*, vol 15, n.º 12, págs. 23.448-23.500, diciembre de 2014.
Circadian activity rhythms during the last days of *Notobranchius rachovii*'s life: A descriptive model of circadian system breakdown. A. Lucas-Sánchez et al. en *Chronobiology International*, vol. 32, n.º 3, págs. 395-404, abril de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Reloj desacompasado. Thomas Kantermann en *MyC* n.º 50, 2011.
Alteraciones nocturnas. Charles A. Czeisler en *IyC*, diciembre de 2013.
Nuestros relojes internos. Keith C. Summa y Fred W. Turek en *IyC*, septiembre de 2015.

FÍSICA NUCLEAR

Una diferencia de masas trascendental

La diferencia entre la masa del neutrón y la del protón ha sido calculada a partir de primeros principios. El hito promete un progreso revolucionario en física nuclear

FRANK WILCZEK

La física nuclear y numerosos aspectos del mundo tal y como lo conocemos dependen de forma crítica de la minúscula diferencia entre la masa del neutrón y la del protón. Con un valor relativo del 0,14 por ciento, este número tendría que poder derivarse a partir de la teoría de las interacciones fuertes (la cromodinámica cuántica, o QCD, por sus siglas en inglés) y electromagnéticas (la electrodinámica cuántica, o QED). Sin embargo, los cálculos asociados revisten tal complejidad que, durante largo tiempo, han quedado fuera del alcance de la comunidad científica. En un trabajo cuyos resultados aparecieron publicados el pasado mes de marzo en *Science*, Szabolcs Borsanyi, de la Universidad de Wuppertal, y otros investigadores han logrado un enorme avance al respecto.

En términos relativos, la masa del neutrón es apenas mayor que la del protón. En las unidades empleadas habitualmente en física de partículas, las masas del neutrón, el protón y el electrón ascienden, respectivamente, a 939,56563, 938,27231 y 0,51099906 megaelectronvoltios (MeV). La diferencia entre la masa de los dos nucleones equivale a 2,53 veces la masa del electrón. Si fuese menor que la masa del electrón, los átomos de hidrógeno serían inestables: se desintegrarían en neutrones y neutrinos mediante un proceso conocido como desintegración beta inversa. Una diferencia ligeramente mayor que la masa del electrón también resultaría catastrófica; en tal caso, poco después de la gran explosión que dio origen al universo, el helio se habría sintetizado de manera mucho más eficiente, lo que habría dejado un cosmos pobre en hidrógeno, el principal combustible de las estrellas como el Sol. Por otro lado, si el neutrón fuese considerablemente más masivo que el protón, la síntesis de elementos más pesados habría resultado difícil o incluso imposible.

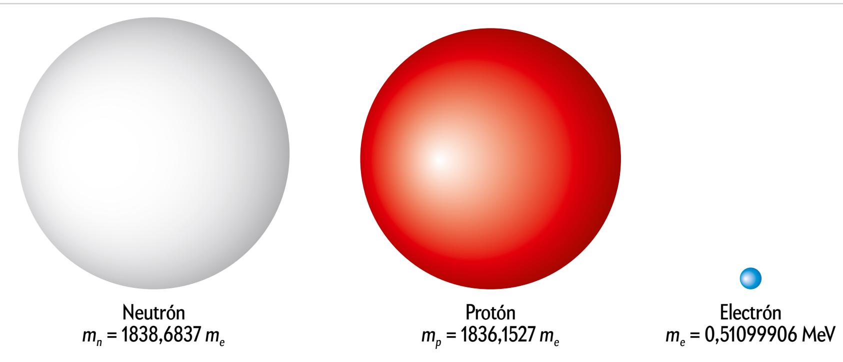
Según nuestro entendimiento actual, la diferencia entre las masas del neutrón y el protón no constituye ninguna constante fundamental de la naturaleza. Debería poder derivarse a partir de otros parámetros más básicos mediante las leyes de la QCD y la QED. La formulación de ambas teorías se encuentra libre de ambigüedades, y sus predicciones han sido verificadas con gran rigor en un sinfín de ocasiones. Ello permite identificar con claridad los principales factores que contribuyen a explicar el pequeño número que nos ocupa. Son dos: la interacción electromagnética y la diferencia de masas de entre los quarks, las partículas elementales que conforman los hadrones.

Si lo único que distinguiera al protón del neutrón fuese la carga positiva del primero, y si esta se distribuyese de manera aproximadamente uniforme en el seno de la partícula, el protón tendría una masa mayor que el neutrón en virtud de su energía electrostática adicional: según la equivalencia entre masa y energía establecida por Einstein, una cantidad de energía

extra se traduce en una masa mayor. Consideraciones más elaboradas, como las que surgen al aplicar el electromagnetismo al modelo quark de los hadrones, conducen a la misma conclusión.

Por fortuna, existe una segunda contribución. Para explicarla resulta conveniente recurrir al modelo quark. Según este, el neutrón se encuentra formado por un quark de tipo *u* (*up*, «arriba») y dos de tipo *d* (*down*, «abajo»). El protón, en cambio, contiene dos quarks *u* y uno *d*. Según las reglas de la QCD, los quarks *u* y *d* interaccionan de la misma manera con los gluones, los mediadores de la interacción fuerte. Sin embargo, sus masas no tienen por qué ser iguales. Y, de hecho, no lo son: el quark *d* posee una masa mayor que el *u*. Dado que el neutrón se diferencia del protón en que contiene un quark *d* en vez de uno de tipo *u*, ello tiende a aumentar la masa del neutrón.

Sin embargo, hoy sabemos que los protones y los neutrones son objetos complejos, y que el modelo quark no proporciona más que una basta caricatura. Para estudiar con precisión las propiedades de estas partículas, hemos de resolver directamente las ecuaciones de la QCD y la QED. Eso es lo que han logrado Borsanyi y sus colaboradores gracias a potentes ordenadores y brillantes algoritmos de cálculo.



UNA PEQUEÑA GRAN DIFERENCIA: En unidades de la masa del electrón (expresada aquí en megaelectronvoltios, MeV), la diferencia entre la masa del neutrón y la del protón asciende a 2,53. Si esa diferencia fuera menor que uno, el átomo de hidrógeno sería inestable. En caso de ser considerablemente mayor que 2,53, casi no habría elementos pesados en la naturaleza. Si las partículas fuesen esferas de densidad constante, sus tamaños exhibirían las proporciones que se observan en esta figura.

Soluciones numéricas y diagramas de Feynman

Aun teniendo en cuenta todas esas complejidades, los quarks *u* y *d* siguen apareciendo como elementos fundamentales de la teoría, sus masas siguen siendo distintas y ambos experimentan la interacción fuerte de idéntico modo. Así pues, las dos contribuciones que hemos presentado de forma heurística se hallan también en la base de un cálculo riguroso.

Si la diferencia de masa entre los quarks *u* y *d* solo se manifestase en la diferencia de masa entre el protón y el neutrón, el problema se reduciría a intercambiar un número por otro. Sin embargo, los quarks *u* y *d* (al igual que otros, como el *s*) se encuentran en el interior de docenas de partículas subatómicas diferentes. Las masas de estas últimas han de poder derivarse a partir de los mismos valores de las masas de los quarks *u* y *d*. Ello ha permitido determinar las masas de los quarks en multitud de ocasiones; un aspecto en el que la teoría se muestra inflexible. De hecho, Borsanyi y sus colaboradores han calculado las masas de un gran número de partículas (el protón y el neutrón entre ellas). Los resultados son coherentes y se hallan en excelente acuerdo con los datos experimentales.

Llegados a este punto, merece la pena señalar una sutileza importante. Una parte de las masas de los quarks se encuentra asociada a la energía de su propio campo electromagnético. Desde un punto de vista formal, esta «autoenergía» es infinita. Los resultados físicos —y, por tanto, finitos— solo se obtienen tras calcular la variación finita que experimenta la autoenergía de los quarks en diferentes situaciones, como cuando forman parte de hadrones distintos. Esta técnica para obtener resultados finitos a partir de cantidades formalmente infinitas recibe el nombre de renormalización. Algunos físicos la encuentran desconcertante, y preferirían disponer de una teoría en la que todos los parámetros fundamentales, medibles o no, correspondiesen a cantidades finitas desde el principio. Pero, por muy desconcertante que resulte, el éxito de los cálculos de Borsanyi y sus colaboradores se basa firmemente en esta técnica. Ello da fe de hasta qué punto la renormalización se encuentra arraigada en la naturaleza.

El trabajo de los autores constituye un avance técnico enorme que ha llevado la potencia computacional hasta los límites de lo factible hoy en día. Dándole la vuelta al argumento, una potencia de cómputo mayor permitirá mejorar sus resultados, cuya precisión es aún limitada. Los autores han demostrado por primera vez la posibilidad de derivar, a partir de consideraciones teóricas fundamentales, el signo correcto de la diferencia de masa entre el neutrón y el protón (algo nada trivial, ya que, como mencionábamos arriba, las estimaciones basadas en la electrostática predicen el signo contrario). Además, la magnitud del resultado es correcta con una precisión aproximada del 20 por ciento.

Desde una perspectiva más amplia, incluir con precisión y en un mismo cálculo las contribuciones de la interacción fuerte y la electromagnética marca todo un hito, ya que las técnicas comúnmente empleadas en cada una resultan muy distintas. Estas son, respectivamente, el cálculo de soluciones numéricas (teorías gauge en el retículo) y teoría de perturbaciones (diagramas de Feynman).

Tal vez en un futuro la física nuclear alcance la precisión y la versatilidad de las que hoy goza la física atómica. Ello tendría grandes implicaciones en astrofísica y, en principio, también en el ámbito tecnológico. Gracias a esta clase de resultados, podemos esperar modelos mucho más precisos de supernovas y estrellas de neutrones y, tal vez, soñar con una «química nuclear» que nos permita almacenar grandes cantidades de energía y fabricar láseres de gran potencia.

—Frank Wilczek
Centro para la Física Teórica
Instituto de Tecnología de Massachusetts

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 520, págs. 303-304, 2015. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015

PARA SABER MÁS

Ab initio calculation of the neutron-proton mass difference. Sz. Borsanyi et al. en *Science*, vol. 347, págs. 1452-1455, marzo de 2015. Disponible en **arxiv.org/abs/1406.4088**

EN NUESTRO ARCHIVO

Las enigmáticas propiedades de los gluones. Rolf Ent, Thomas Ullrich y Raju Venugopalan en *IyC*, julio de 2015.

ASTROPARTÍCULAS

MATERIA OSCURA

Las partículas invisibles que dominan el cosmos podrían

LA GALAXIA DE ANDRÓMEDA, al igual que la mayoría de las galaxias espirales, gira más rápido de lo que cabría esperar si la materia visible fuese la única causante de la atracción gravitatoria. Para explicar esta y otras discrepancias, los físicos han postulado la existencia de materia oscura, una sustancia invisible que abundaría en el universo.

COMPLEJA

darse en extrañas y variadas formas

Bogdan A. Dobrescu y Don Lincoln

EN SÍNTESIS

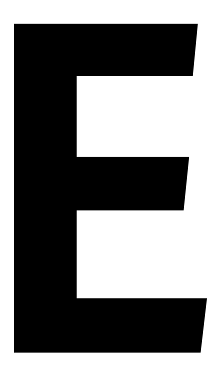
Los físicos creen que en el universo hay mucha más materia que la que podemos ver. Hasta ahora, la mayor parte de los modelos sobre esta materia oscura han supuesto la existencia de un solo tipo de partícula invisible.

Algunos expertos han comenzado a considerar la posibilidad de que la materia oscura responda a una composición más exótica. El sector oscuro podría incluir varias clases de partículas, así como interacciones propias.

Una materia oscura compleja podría formar «átomos oscuros» e incluso agruparse para dar lugar a discos similares al de la parte visible de las galaxias. Varios experimentos y observaciones intentan poner a prueba estas posibilidades.

Bogdan A. Dobrescu es físico teórico en el Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi (Fermilab), cerca de Chicago. En fecha reciente ha investigado la posibilidad de que las partículas de materia oscura pudieran producirse en el acelerador principal del Fermilab y la manera de observar sus efectos en los detectores de neutrinos.

Don Lincoln es físico veterano del Fermilab e investiga con los resultados del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. Ha escrito varios libros de divulgación; su último título es *The Large Hadron Collider: The extraordinary story of the Higgs boson and other stuff that will blow your mind* (Johns Hopkins University Press, 2014).



EL HERMOSO MOLINILLO GIRATORIO DE LA GALAXIA DE ANDRÓMEDA, NUESTRA VECINA cósmica, plantea un enigma. Su vertiginosa velocidad de rotación no puede explicarse aplicando las leyes conocidas de la física a la materia visible del disco. La gravedad producida por la masa aparente de la galaxia debería hacer que las estrellas de la periferia se movieran mucho más despacio de lo que lo hacen. Si la materia que vemos fuese todo lo que hay en el universo, Andrómeda, al igual que casi todas las galaxias de rotación rápida, no existiría en su forma actual.

Los cosmólogos creen que algún tipo de sustancia invisible, la materia oscura, rodea e impregna tanto Andrómeda como otras galaxias, lo que proporcionaría la atracción gravitatoria adicional que parece hacer falta para explicar su rápida rotación. Se calcula que la cantidad de materia oscura presente en el universo supera en unas cinco veces a la de materia normal. Esta enigmática sustancia también daría cuenta de otros fenómenos; entre ellos, el veloz movimiento de las galaxias en el interior de los cúmulos galácticos, la distribución de materia que resulta cuando dos de estos cúmulos colisionan, o el efecto de lente gravitacional (la curvatura de los rayos de luz causada por la gravedad) observado en galaxias lejanas.

Las teorías más simples sobre la materia oscura postulan que esta se compone de un solo tipo de partícula. Sin embargo, tras décadas de búsqueda, nadie ha sido capaz de obtener indicios directos de su existencia. Además, existen algunas discrepancias entre las observaciones astronómicas y las predicciones basadas en estas teorías simples. La combinación de estos pequeños desacuerdos con el fracaso a la hora de detectar esta esquiva sustancia ha llevado a algunos científicos a cuestionar las teorías tradicionales y proponer otras más elaboradas. En lugar de constar de un único tipo de partícula, la materia oscura podría hallarse compuesta por todo un abanico de especies invisibles. Al fin y al cabo, la materia ordinaria se presenta en múltiples formas, así que tal vez lo mismo suceda con la materia oscura.

En los últimos años, las sospechas de que podría existir más de una variedad de materia oscura han ido en aumento. Los expertos también han comenzado a considerar la posibilidad, más fascinante si cabe, de que haya nuevas fuerzas que actúen con gran intensidad sobre la materia oscura, pero que apenas afecten —si es que lo hacen en absoluto— a la materia ordinaria. Algunas observaciones recientes de galaxias en colisión parecen apoyar de manera preliminar esta hipótesis. Las nuevas fuerzas también podrían a ayudar a limar las discrepancias entre los modelos más simples y las observaciones. Si la materia oscura fuese una sustancia compleja, el universo sería un lugar mucho más intrincado e interesante que el que los cosmólogos suelen imaginar.

MATERIA INVISIBLE

Aunque ignoramos la composición de la materia oscura, algunas de sus propiedades pueden deducirse a partir de las observaciones de su influencia sobre la materia normal y las simulaciones de sus efectos gravitatorios. Sabemos que la materia oscura ha de moverse mucho más despacio que la luz; de lo contrario, las fluctuaciones de densidad en el universo primitivo no habrían dado lugar a las estructuras galácticas que observamos hoy en día. Ello implica que las partículas que la componen probablemente posean una masa relativamente grande (ya que, de otro modo, se moverían a velocidades próximas a la de la luz). Que no las veamos quiere decir que no absorben ni emiten radiación electromagnética, por lo que han de ser eléctricamente neutras. Además, no pueden experimentar la interacción nuclear fuerte, ya que entonces habríamos descubierto indicios de su interacción con los rayos cósmicos. Y aunque hasta hace poco se creía que la materia oscura podría interaccionar mediante la fuerza nuclear débil, varias observaciones recientes han puesto en duda dicha hipótesis.

Sabemos también que las partículas de materia oscura han de ser estables en escalas de tiempo cósmicas. La razón es simple: no se conoce ningún mecanismo plausible capaz de producir constantemente materia oscura, por lo que esta ha de ser primigenia; es decir, tuvo que crearse en la gran explosión. Esa estabilidad entraña una profunda consecuencia: sus partículas han de poseer alguna propiedad conservada (inmutable en el tiempo) que impida su desintegración. Un ejemplo familiar del mismo fenómeno lo hallamos en la carga eléctrica, cuya conservación asegura la estabilidad del electrón. Es una verdad universal de las leyes físicas que toda partícula acaba desintegrándose en otras más ligeras a menos que haya algo que se lo impida. El electrón posee carga eléctrica, pero las dos únicas partículas más ligeras que él (el fotón y el neutrino) no. Desde un punto de vista energético, el electrón podría desintegrarse en estos objetos, pero la conservación de la carga eléctrica se lo prohíbe.

La mayoría de las teorías asocian a las partículas de materia oscura una cantidad conservada, denominada «paridad»

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DE NASA, ESA, JULIANNE DALCANTON, B. F. WILLIAMS Y L. C. JOHNSON, UNIVERSIDAD DE WASHINGTON, PANCHROMATIC HUBBLE ANDROMEDA TREASURY (PHAT) Y ROBERT GENDLER

por motivos históricos. Las partículas de materia oscura tendrían paridad –1, mientras que las normales se caracterizarían por una paridad de +1. Por tanto, las primeras no podrían desintegrarse en las segundas, pues dicho proceso violaría la conservación de la paridad.

La teoría más sencilla que cumple con todos los requisitos postula la existencia de una única partícula de la materia oscura. Esta recibe el nombre de WIMP, por las siglas en inglés de «partícula masiva que interacciona débilmente» (*wimp* también significa «debilucho» o «enclenque» en dicha lengua). En este contexto, el término *débil* se utiliza en un sentido genérico, sin que tenga por qué referirse exclusivamente a la interacción nuclear débil. La existencia de WIMP se encuentra bien motivada por varias razones teóricas; sin embargo, encontrarlas está resultando mucho más difícil de lo que se pensaba.

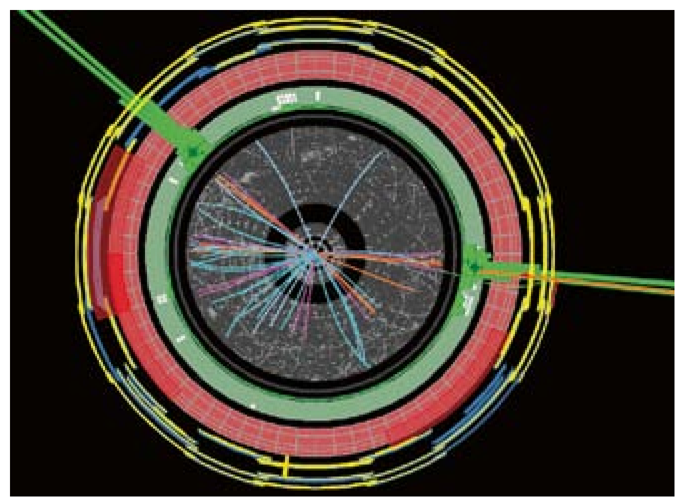
Desde los años noventa, varios experimentos han intentado detectar WIMP de manera directa en sus esporádicas interacciones con la materia ordinaria. Para lograr la sensibilidad requerida, los detectores se enfrían a temperaturas muy bajas y se entierran a grandes profundidades; esto último persigue protegerlos de los omnipresentes rayos cósmicos, los cuales podrían imitar el efecto de la materia oscura. No obstante, y a pesar de contar con una precisión cada vez mayor, ninguno de estos experimentos ha observado hasta ahora una prueba concluyente de la existencia de WIMP [*véase* «El estado actual de la búsqueda de materia oscura», por Alejandro Ibarra; Investigación y Ciencia, junio de 2014].

Por otro lado, si bien los modelos de tipo WIMP explican varias observaciones astronómicas, tampoco pueden acomodarlas todas. Las teorías basadas en WIMP predicen que el número de galaxias enanas que orbitan en torno a la Vía Láctea debería ser bastante mayor que el observado [*véase* «Galaxias enanas y materia oscura», por Pavel Kroupa y Marcel Pawlowski; Investigación y Ciencia, marzo de 2011]. Asimismo, implican una densidad de materia oscura en los centros galácticos superior a la que se deduce a partir de las velocidades de rotación de las galaxias. Con todo, la situación evoluciona con rapidez. Hace poco, la colaboración Cartografiado de la Energía Oscura (DES, por sus siglas en inglés) anunció el posible hallazgo de nuevas galaxias satélite en torno a la Vía Láctea, lo que sugiere que la mencionada discrepancia podría deberse a que aún no se han encontrado la mayoría de estos objetos [*véase* «El lado oscuro de la Vía Láctea», por Leo Blitz; Investigación y Ciencia, diciembre de 2011].

FOTONES OSCUROS

Tales deficiencias de las teorías basadas en WIMP han abierto la puerta a considerar formas más complejas de materia oscura. En lugar de una sola clase de partícula, cabe imaginar que esta enigmática sustancia se componga de varias de ellas; al mismo tiempo, podría haber nuevas interacciones que no afectasen a las partículas ordinarias, pero sí a las de materia oscura. Estas podrían llevar aparejada una «carga oscura», lo que provocaría que se atrajesen o repeliesen a pesar de ser eléctricamente neutras. Y, del mismo modo que las partículas normales con carga eléctrica emiten fotones, las partículas con carga oscura radiarían «fotones oscuros». Por supuesto, no hablamos de cuantos de luz; el nombre hace referencia a partículas que interaccionarían con la carga oscura de manera análoga a como los fotones ordinarios lo hacen con la carga eléctrica.

En todo caso, el paralelismo con la materia normal ha de detenerse en algún punto. La razón para ello es la siguiente. Supongamos que las reglas del mundo oscuro imitasen a la perfección a las del nuestro. En tal caso, se formarían átomos oscuros y se emitirían fotones oscuros al mismo ritmo al que la materia normal emite fotones ordinarios. En nuestro mundo, la emisión de fotones permite el intercambio de energía y constituye, en última instancia, la razón por la que las galaxias finalmente se relajan hasta adquirir forma de disco. Las nubes de gas en el interior de las galaxias radian energía electromagnética, lo que provoca que la materia que las compone se agrupe por acción de la gravedad. La conservación del momento angular impide que toda la materia se contraiga en un mismo punto, pero las estructuras con aspecto de disco se forman con facilidad. Si las leyes e interacciones que rigen el comportamiento de la materia oscura fuesen análogas a las de la materia normal, la emisión de fotones oscuros provocaría que las galaxias de materia oscura formasen discos achatados. Sin embargo, sabemos que la distribución de materia oscura alrededor de las galaxias se parece más a una nube esférica que a un disco. Por tanto, hemos de descartar un mundo de materia oscura que imite al nuestro en todos sus detalles.



LOS CHOQUES ENTRE PROTONES que lleva a cabo el Gran Colisionador de Hadrones del CERN podrían revelar la existencia de «fotones oscuros». Esta imagen reproduce un suceso compatible con dicha hipótesis en el detector ATLAS.

CORTESÍA DEL EXPERIMENTO ATLAS, © 2014 CERN

Con todo, aún quedan múltiples alternativas. Es posible que la mayor parte de la materia oscura se comporte como postulan los modelos de tipo WIMP, pero que una pequeña parte siga leyes análogas a las del universo visible. O tal vez la carga oscura tome un valor efectivo mucho más pequeño que el de la carga eléctrica de protones y electrones, lo que implicaría una menor emisión de fotones oscuros. Algunos físicos teóricos, incluido uno de nosotros (Dobrescu), han propuesto nuevas ideas sobre la constitución e interacciones del sector oscuro, usando los datos existentes como guía para orientar las posibilidades y restringir las especulaciones. Uno de los escenarios más simples, que solo introduce dos tipos de partículas de materia oscura, nos permite entrever parte de la física que podría surgir en un universo con materia oscura compleja.

Imaginemos un mundo en el que la carga oscura pudiese ser positiva o negativa. Este modelo contempla una interacción en el sector oscuro análoga al electromagnetismo, lo que implica que las partículas de materia oscura emitirían y absorberían fotones

Continúa en la página 20

Toda la materia del universo

Además de la materia ordinaria, o «bariónica», se cree que en el cosmos debe haber una gran cantidad de materia invisible que explique la rápida velocidad de rotación de las galaxias y la cohesión de los cúmulos galácticos. Aunque hasta ahora no existen indicios directos sobre su naturaleza, los físicos suponen que la materia oscura se compone de partículas inmunes al electromagnetismo (razón por la que serían invisibles) y a la interacción nuclear fuerte. Sin embargo, otros detalles siguen siendo un misterio.

JEN CHRISTIANSEN

Principales candidatos a materia oscura

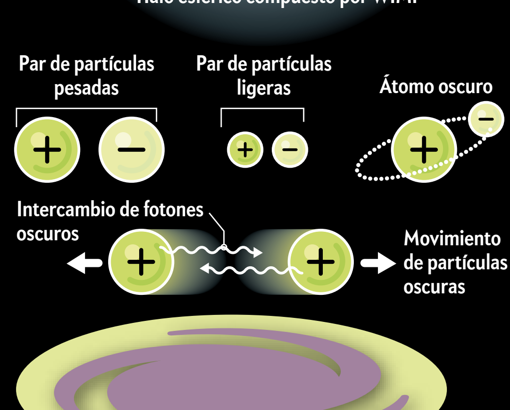
CALIENTE
Si la mayor parte de la materia oscura estuviese constituida por partículas muy veloces, jamás habría llegado a agruparse lo suficiente para formar nubes esféricas alrededor de las galaxias. Con todo, una pequeña fracción de la materia oscura sí podría ser de tipo caliente.

FRÍA
Las partículas de materia oscura con velocidades bajas explican mejor la existencia de las galaxias y la distribución de materia a gran escala en el universo. Se cree que al menos el 95 por ciento de la materia oscura es de tipo frío.

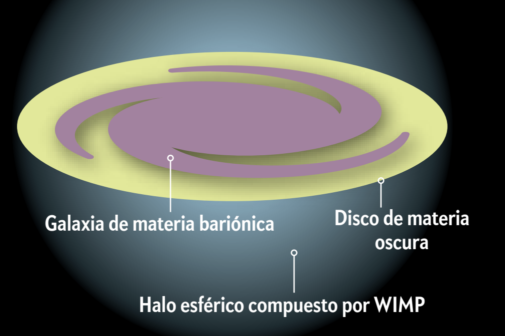
SIN INTERACCIONES MUTUAS
La hipótesis más simple postula que la materia oscura fría estaría formada por un solo tipo de partícula, denominada WIMP («partícula masiva que interacciona débilmente»). Dichas partículas solo interaccionarían muy esporádicamente entre sí y con la materia ordinaria. Las WIMP se agruparían formando nubes esféricas cuya atracción gravitatoria sobre la materia normal desencadenaría la formación de galaxias.



CON INTERACCIONES MUTUAS
Si la materia oscura interaccionase consigo misma, habría de hacerlo a través de alguna «fuerza oscura» que no surtiese efecto sobre la materia bariónica. Dicha interacción podría ser análoga al electromagnetismo, lo que implicaría la existencia de partículas con carga oscura positiva y negativa, las cuales intercambiarían fotones oscuros. Los modelos dejan margen para la existencia de varias clases de partículas oscuras, unas ligeras y otras pesadas, que podrían formar agregados análogos a los átomos ordinarios. A su vez, ello permitiría la formación de grandes estructuras cósmicas similares al disco de las galaxias espirales.



DOS COMPONENTES
La materia oscura fría podría constar de varias clases de partículas. Algunas de ellas apenas interaccionarían entre sí (como las WIMP), mientras que otras experimentarían sus propias fuerzas. Las primeras formarían grandes nubes esféricas alrededor de las galaxias; las segundas podrían dar lugar a discos compactos de materia oscura.



Viene de la página 17
oscuros. Y, al igual que ocurre cuando una partícula de materia ordinaria se encuentra con su antipartícula, las partículas de materia oscura dotadas de carga opuesta podrían también aniquilarse y convertirse en fotones oscuros.

Resulta posible extraer algunas conclusiones sobre la intensidad de esta interacción oscura —y, por ende, sobre la frecuencia con que las partículas de materia oscura se aniquilarían mutuamente— al considerar sus efectos sobre las galaxias. Recordemos que la razón fundamental por la que las galaxias acaban formando estructuras achatadas se debe a que el electromagnetismo permite que la materia ordinaria radie energía, un proceso que ocurre incluso en ausencia de aniquilación entre partículas. Puesto que sabemos que la materia oscura tiende a distribuirse de manera aproximadamente esférica alrededor de la mayor parte de las galaxias, cabe concluir que no puede perder energía por emisión de fotones oscuros al mismo ritmo que lo hace la materia normal por emisión de fotones ordinarios. En un estudio publicado en 2009, Lotty Ackerman, Matthew R. Buckley, Sean M. Carroll y Marc Kamionkowski, por entonces todos en el Instituto de Tecnología de California, demostraron que ello implicaba que, en caso de existir, la carga oscura tendría que adoptar un valor muy pequeño, de en torno al uno por ciento del de la carga eléctrica normal. Pero, incluso con un valor tan exiguo, la fuerza oscura seguiría existiendo, lo que implicaría consecuencias considerables sobre las galaxias.

GALAXIAS OSCURAS

Hasta ahora hemos descrito un modelo sencillo de materia oscura, con solo dos clases de partículas dotadas de carga opuesta y un único tipo de fotón oscuro. Pero la complejidad de este sector oscuro aún palidece en comparación con la que exhibe la materia ordinaria. ¿Qué ocurriría si hubiese múltiples especies de partículas dotadas de carga oscura?

Se han concebido varias propuestas al respecto. Un modelo de especial interés fue formulado en 2013 por JiJi Fan, Andrey Katz, Lisa Randall y Matthew Reece, por entonces todos en Harvard. Los investigadores postularon un sector oscuro compuesto en su mayor parte de WIMP, pero en el que una pequeña fracción estaría formada por dos tipos de fermiones (partículas de espín semientero, como el protón, el neutrón o el electrón): uno pesado y otro ligero, ambos portadores de carga oscura. Debido a dicha carga, tales partículas podrían atraerse mutuamente y emitir fotones oscuros.

Aunque hay que extremar las precauciones para no sobreinterpretar la analogía, la idea de Fan y sus colaboradores resulta muy similar a postular un protón, un electrón y un fotón oscuros. Dependiendo de las masas y cargas de los fermiones oscuros, estos podrían combinarse para formar átomos con su propia química oscura, moléculas e incluso estructuras aún más complejas. La noción de átomos oscuros ya había sido explorada en detalle en 2010 por David E. Kaplan, Gordan Z. Krnjaic, Keith R. Rehermann y Christopher M. Wells, por entonces todos ellos en la Universidad Johns Hopkins.

Los físicos de Harvard derivaron un límite superior para la fracción de materia oscura que podría estar fuertemente acoplada a los fotones oscuros. A partir de observaciones astronómicas, los investigadores concluyeron que la masa total de materia oscura sujeta a tales interacciones podría resultar equiparable a la de materia visible. En tal caso, la Vía Láctea constaría de una gran nube esférica de partículas de tipo WIMP, las cuales darían cuenta del 70 por ciento de la masa de la galaxia, cuyo interior albergaría dos discos achatados, cada uno con el 15 por ciento de la masa total. Uno sería el de materia ordinaria, con los brazos espirales que vemos, mientras que el otro estaría formado por materia oscura sujeta a intensas interacciones mutuas. Uno y otro disco no tendrían por qué estar perfectamente alineados, aunque cabría esperar que mostrasen una orientación similar. En tal caso, la parte visible de la Vía Láctea coexistiría con un disco oscuro casi en el mismo espacio físico. Una salvedad: ese disco oscuro no contendría el equivalente a estrellas ni grandes planetas, ya que en tal caso estos habrían sido detectados a partir de sus efectos de lente gravitacional sobre la luz visible.

La idea puede sonar radical, pero la presencia de semejante disco oscuro no afectaría demasiado a la materia normal. Podríamos estar viviendo en un universo como el descrito sin ser conscientes de ello.

PERSPECTIVAS EXPERIMENTALES

La materia oscura compleja puede buscarse de la misma manera que la de tipo WIMP: con detectores subterráneos ultrasensibles. Si una fracción de la materia oscura formase un disco más o menos alineado con el de la materia visible de la galaxia, dicha componente sería más densa de lo que predicen los modelos basados únicamente en WIMP. Tal aumento de densidad podría traducirse en una probabilidad de detectar materia oscura mayor que la predicha por las teorías al uso.

Los fermiones oscuros podrían combinarse para formar átomos con su propia química oscura, moléculas e incluso estructuras aún más complejas

Otra estrategia para identificar las partículas que componen la materia oscura consiste en intentar producirlas en los aceleradores de partículas. Dado lo poco que sabemos acerca de cómo interaccionan con la materia ordinaria —y, por tanto, qué tipo de procesos contribuirían a crearla en un acelerador—, los expertos se han embarcado en un amplio programa de investigación. Este persigue poner a prueba todo tipo de modelos de materia oscura, desde aquellos basados en WIMP hasta otros más elaborados. Para ello resulta imprescindible hacer algunas suposiciones; entre ellas, que la materia oscura y la ordinaria interaccionan mediante una o varias fuerzas considerablemente más intensas que la gravedad (de lejos, la menos vigorosa de todas las interacciones conocidas), pero lo suficientemente débiles para haber pasado inadvertidas hasta ahora. Esta hipótesis es necesaria porque, si la materia oscura solo interaccionase por medio de la gravedad, jamás podríamos crearla en ningún acelerador de partículas concebible ni la veríamos en ningún experimento de detección directa. Nótese, además, que dichas fuerzas serían distintas de aquellas mediante las cuales la materia oscura podría interactuar consigo misma.

El Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN es el acelerador más potente del mundo. Ello le otorga una ventaja a la hora de buscar partículas de materia oscura dotadas de gran masa (cuanto más masiva es una partícula, más energía

hace falta invertir para producirla en un acelerador), así como aquellas cuyas interacciones se vuelven más frecuentes a medida que la energía aumenta. Dado que sabemos que la materia oscura solo puede interaccionar muy débilmente con la materia ordinaria, no cabe esperar observarla directamente en los detectores, ya que estos se componen de materia normal. Así pues, los investigadores buscan procesos en los que «falta» energía. Por ejemplo, el choque de dos protones puede resultar en la producción de varias partículas ordinarias que salen despedidas en una dirección, más un par de partículas de materia oscura que abandonan el detector en sentido contrario. La huella experimental de un suceso semejante sería la energía observada en uno de los lados del detector y una ausencia de señal en el otro. Los investigadores calculan cuántas colisiones dan lugar a sucesos de ese tipo en ausencia de producción de partículas de materia oscura, y comprueban después si el número de eventos observados es superior al predicho.

Hasta ahora el LHC no ha detectado ningún exceso de sucesos de esa clase, lo que indica que las interacciones entre la materia oscura y la ordinaria han de ser muy poco frecuentes, si es que se dan en absoluto. Aun así, una nueva ventana de oportunidad se abrió la pasada primavera con el inicio de la segunda fase de operaciones del acelerador, en la que este operará a una energía mucho mayor que durante la primera. El descubrimiento del siglo podría estar a la vuelta de la esquina.

Además de las búsquedas que acabamos de describir, adecuadas para detectar tanto WIMP como materia oscura compleja, otros intentos se han centrado en la posibilidad de observar fotones oscuros. Algunos modelos sugieren que estas partículas podrían transformarse continuamente en fotones ordinarios, y viceversa, lo que abre la puerta a detectar los fotones resultantes. Otros postulan la existencia de fotones oscuros de masa no nula (lo que hace hasta cierto punto artificial el uso del término *fotón*, ya que los cuantos de luz carecen de masa), por lo que en principio podrían desintegrarse en partículas más ligeras. Y, si dichos fotones oscuros pudieran transformarse brevemente en fotones normales, habría una pequeña probabilidad de que en el proceso se creasen pares electrón-positrón o muon-antimuón (el «primo pesado» del electrón).

Esas señales son las que buscan varias colaboraciones, incluida una a la que pertenece uno de nosotros (Lincoln). Los estudios de este tipo se están llevando a cabo en el LHC y en otros experimentos, como el KLOE-2, del Instituto Nacional de Física Nuclear italiano, en los Laboratorios Nacionales de Frascati; en el proyecto Búsqueda de Fotones Pesados (HPS), de las Instalaciones del Acelerador Nacional Thomas Jefferson, en Virginia, o en el experimento de detección BaBar, del Laboratorio del Acelerador Nacional SLAC, en California, donde los científicos también están analizando los datos tomados hace más de una década por un experimento denominado mQ.

Otra propuesta de interés tiene lugar en el Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi (Fermilab), cerca de Chicago. En sus instalaciones se generan haces de neutrinos que apuntan hacia detectores lejanos. Estas partículas subatómicas poseen una masa ínfima y solo experimentan la fuerza nuclear débil (aparte de la gravedad). Si la materia oscura interacciona con la ordinaria mediante fotones oscuros, tal vez las partículas correspondientes se generen en los mismos haces de neutrinos y su efecto pueda detectarse en los experimentos MiniBooNE, MINOS o NOvA del Fermilab.

Por último, otra posibilidad consiste en buscar indicios de interacciones de materia oscura en las observaciones astronómicas, como las relativas a las colisiones entre galaxias. En tales casos, cuando la materia oscura de una de las galaxias golpea contra la materia oscura de la otra, sus partículas podrían repelerse mediante el intercambio de fotones oscuros. Aunque varios estudios han arrojado resultados negativos al respecto, hace apenas unos meses pareció observarse este tipo de efecto en el cúmulo Abell 3827, cercano a la Tierra y dispuesto en una orientación favorable [*véase* «¿Interacciones de materia oscura?», por Clara Moskowitz; Investigación y Ciencia, junio de 2015]. Aún harán falta más estudios para confirmar el fenómeno, pero, por el momento, los datos de este cúmulo se antojan prometedores para los modelos de materia oscura compleja.

ROMPECABEZAS CÓSMICO

No cabe duda de que nos enfrentamos a un intrincado acertijo. A grandes escalas, la materia ordinaria no se comporta conforme a lo que cabe esperar de las leyes conocidas de la física y la distribución de masa visible. En consecuencia, la mayoría de los científicos se hallan convencidos de que existe alguna forma de materia oscura. Sin embargo, de qué se compone exactamente esta sustancia plantea cada vez más preguntas, más aún cuando los sucesivos experimentos que han intentado detectarla han acabado con las manos vacías. Por esta razón, y debido a las persistentes discrepancias entre algunas observaciones y los modelos más simples basados en WIMP, algunos expertos han comenzado considerar la existencia de materia oscura compleja. Estos modelos ofrecen un mayor número de parámetros libres, lo que deja más margen para ajustar datos y teoría. Al mismo tiempo, acercan las propiedades del sector oscuro a las de la materia ordinaria, compuesta por una rica variedad de partículas.

Una crítica que puede hacerse a este planteamiento es que tal vez constituya un esfuerzo injustificado para mantener viva la hipótesis de la materia oscura. ¿Acaso no recuerda a la idea de los epiciclos, con la que los astrónomos del siglo XVI se aferraron al geocentrismo a costa de añadir toda una serie de continuos retoques a una teoría condenada al fracaso? Creemos que no, ya que la materia oscura permite explicar de manera asombrosa todo tipo de observaciones astronómicas. Y, por otro lado, no hay ninguna razón para suponer que la materia oscura deba ser tan simple como proponen las teorías basadas en WIMP.

Ante nuestros ojos yace un misterio cuya respuesta ignoramos. Hasta que la encontremos, habremos de permanecer abiertos a todas las alternativas, incluida la fascinante posibilidad de que estemos viviendo junto a una realidad oscura paralela. ¿Quizás algún científico oscuro esté dirigiendo su atención al cielo y preguntándose por nuestra existencia?

PARA SABER MÁS

Dark matter and dark radiation. Lotty Ackerman et al. en *Physical Review D*, vol. 79, n.º 2, art. n.º 023.519, enero de 2009.

Atomic dark matter. David E. Kaplan et al. en *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, vol. 2010, n.º 5, art. n.º 021, mayo de 2010.

Dark-disk universe. JiJi Fan et al. en *Physical Review Letters*, vol. 110, n.º 21, art. n.º 211.302, mayo de 2013.

The cosmic cocktail: Three parts dark matter. Katherine Freese. Princeton University Press, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Mundos oscuros. Jonathan Feng y Mark Trodden en *IyC*, enero de 2011.

Tras el rastro de los axiones. Joerg Jaeckel, Axel Lindner y Andreas Ringwald en *IyC*, marzo de 2015.



NEUROCIENCIA

TOXINAS VEGETALES SALUDABLES PARA EL CEREBRO

Algunos compuestos que producen las plantas para defenderse de las plagas estimulan las neuronas, un efecto que podría aprovecharse para proteger al cerebro frente a enfermedades como el alzhéimer y el párkinson

Mark P. Mattson



I SE PREGUNTA A ALGUIEN POR LA CALLE POR QUÉ LAS FRUTAS Y VERDURAS SON BUENAS para la salud, probablemente mencione los antioxidantes que estos alimentos contienen. Es un razonamiento lógico, ya que en dolencias importantes, como el cáncer, las enfermedades cardiovasculares y la diabetes, la célula sufre daños causados por unos compuestos, los radicales libres, que son neutralizados por los antioxidantes.

EN SÍNTESIS

Al no poder huir de los depredadores, las plantas han desarrollado un complejo sistema de defensas químicas para evitar que los insectos y otros animales se las coman.

Los humanos, al consumir fruta y verdura, ingerimos pequeñas cantidades de los compuestos tóxicos que las plantas utilizan contra sus depredadores. La exposición a estas sustancias causa una pequeña reacción de estrés en nuestras células que las hace más resistentes.

El proceso de adaptación a ese estrés, denominado hormesis, aporta numerosos beneficios para la salud, como la protección contra las enfermedades neurológicas que nos proporcionan el brócoli y los arándanos.

BILL MAYER

Como neurólogo conozco desde hace tiempo el efecto nocivo (a veces mortal) de los radicales libres sobre las neuronas. Y también sé que las personas que consumen con regularidad verduras, frutas y otros productos vegetales ricos en antioxidantes suelen poseer cerebros más sanos y tienden a sufrir menos enfermedades neurodegenerativas. Pero el efecto de los antioxidantes no resulta simple.

De hecho, cuando se han evaluado en ensayos con animales y humanos, los antioxidantes como las vitaminas C, E y A no han demostrado que prevengan o mejoren la enfermedad. Entonces, ¿por qué es sano comer frutas y verduras? [*véase* «El mito de los antioxidantes», por Melinda Wenner Moyer; Investigación y Ciencia, abril de 2013].

La respuesta tiene mucho que ver con las estrategias que las plantas han desarrollado durante millones de años para protegerse contra las plagas. Los compuestos que producen con sabor amargo actúan como plaguicidas naturales. Cuando ingerimos alimentos vegetales, consumimos pequeñas cantidades de estos productos tóxicos, lo cual genera un ligero estrés en nuestras células, de modo similar a lo que sucede con el ejercicio físico o el ayuno prolongado. Pero las células no se mueren; de hecho, se vuelven más fuertes, porque al responder al estrés aumenta su capacidad para adaptarse a niveles aún mayores de estrés. Este proceso que promueve la resistencia celular se llama hormesis y, según distintas investigaciones, parece contribuir a las propiedades saludables de las frutas y verduras. Entender los mecanismos de la hormesis podría incluso proporcionar nuevas maneras de prevenir o tratar algunas de las enfermedades más devastadoras del cerebro, como el alzhéimer, el párkinson o el ictus.



Mark P. Mattson es director del Laboratorio de Neurociencias del Instituto Nacional de Geriatría de EE.UU. y profesor de neurología en la facultad de medicina de la Universidad Johns Hopkins. Sus descubrimientos han permitido conocer mejor los circuitos nerviosos durante el envejecimiento.

ESTRÉS SALUDABLE

Mi grupo de investigación ha obtenido algunos datos sobre la hormesis en el cerebro después de acercarse a este tema de una manera algo enrevesada. A principios de los años noventa, cuando nos hallábamos en el Centro Gerontológico Sanders-Brown, en la Universidad de Kentucky, nos propusimos averiguar si los antioxidantes podrían ofrecer un tratamiento contra el alzhéimer. Pensamos en su posible efecto positivo porque habíamos comprobado que el amiloide beta (la proteína que se acumula en exceso en el cerebro de los pacientes de alzhéimer) causaba estragos en neuronas cultivadas y sabíamos que los radicales libres se hallaban implicados en el proceso destructor. Sin embargo, Douglas R. Galasko y Paul Aisen, ambos en la Universidad de California en San Diego, demostraron en un ensayo clínico que la administración de altas dosis de antioxidantes no ofrecía una mejoría a los pacientes de alzhéimer. Entonces reorientamos nuestros esfuerzos hacia una cuestión distinta, que, de manera fortuita, nos llevó a plantear una nueva hipótesis sobre la razón por la que las verduras son buenas para la salud cerebral.

Tanto nosotros como otros investigadores habíamos observado que las personas que practican ejercicio físico consumen pocas calorías y se mantienen intelectualmente activas tienden a presentar un buen funcionamiento cerebral, al contrario de lo que sucede en las personas con las costumbres opuestas. También sufren con menor probabilidad alzhéimer, párkinson o ictus. Nos preguntábamos si la dieta, el ejercicio físico y la actividad intelectual influirían en las funciones cerebrales y en la predisposición a la enfermedad al repercutir los tres factores sobre los mismos procesos moleculares en las neuronas.

En un primer paso, en un estudio realizado en 1999 por Annadora Bruce-Keller, entonces investigadora posdoctoral en mi laboratorio y ahora profesora en el Centro de Investigación Biomédica de Pennington, en la Universidad estatal de Luisiana, descubrimos que las neuronas de ratas sometidas a ayuno en días alternos mostraban una mayor resistencia a las neurotoxinas responsables de síntomas asociados a la epilepsia y a la enfermedad de Huntington, mientras que los animales con alimentación normal sucumbían ante estos compuestos. Poco después, me propusieron que dirigiera el Laboratorio de Neurociencias del Instituto Nacional de Geriatría de EE.UU., donde demostramos que el ayuno en días alternos también protegía al cerebro en los modelos animales de alzhéimer, párkinson e ictus.

Al intentar comprender por qué el ayuno resultaba beneficioso para el cerebro, averiguamos que las neuronas respondían a la falta de alimento movilizando defensas moleculares contra los radicales libres y contra la acumulación de amiloide beta. Los sistemas de defensa consistían en producir proteínas conocidas como neurotrofinas, tales como el factor neurotrófico derivado del cerebro (BDNF, por sus siglas en inglés), que son esenciales para la supervivencia de la neurona, así como proteínas que promueven el uso eficiente de la energía e impiden la acumulación de moléculas dañadas.

Desde un punto de vista evolutivo, no debería sorprendernos que el ayuno intermitente ofrezca ventajas, ya que crea un pequeño estrés que lleva al cerebro a un estado en el que se da máxima prioridad a la protección de las neuronas. Esta permite un funcionamiento eficiente del organismo y la obtención de alimentos incluso cuando dispone de poca energía y debe gastarla para conseguirlos.

Nuestro interés por los beneficios del estrés en las neuronas nos llevó a estudiar los efectos neurológicos de las plantas que componen nuestra dieta. Nos intrigaban unos estudios de los años setenta del siglo xx sobre una neurotoxina presente en algas marinas, el ácido kaínico. En ellos se demostraba que tal molécula se unía a unos receptores en la superficie de las neuronas y los estimulaba en exceso. Tales receptores constituyen el lugar de anclaje del glutamato, la molécula principal que activa las neuronas.

Nuestro grupo y otros ya habíamos demostrado los efectos contrapuestos del glutamato en el ayuno y el ejercicio. Un estímulo excesivo de los receptores puede dañar o destruir las neuronas, mientras que una activación más moderada pone en marcha una ruta química que desempeña una función fundamental en el aprendizaje, la memoria y la protección neuronal. Tales hallazgos nos hicieron plantear la cuestión de si una baja concentración de neurotoxinas vegetales en las frutas y verduras podría también favorecer la salud al inducir un pequeño estrés en las células de cerebro.

DEFENSAS VEGETALES

Las propiedades saludables de frutas y verduras son el resultado inesperado de la guerra que las plantas han librado desde hace eones contra las plagas que las destruyen, sobre todo de insec-

tos. Para sobrevivir como individuos y como especie, tuvieron que desarrollar maneras de evitar su propia extinción. Y, tras cientos de millones de años de evolución, acabaron produciendo plaguicidas naturales [*véase* «Defensas químicas de las plantas superiores», por Gerald A. Rosenthal; Investigación y Ciencia, marzo de 1986].

Estos compuestos no suelen matar a los insectos. Una planta no se preocupa de si los depredadores mueren o no; sencillamente desea mantenerlos alejados. Una manera de lograrlo consiste en atacar a su sistema nervioso. Los vegetales generan sustancias que actúan sobre unas neuronas en la zona bucal de los insectos, llamadas sensillas, que se asemejan a las células de las papilas gustativas en la lengua humana. Las señales de esas células se transmiten al cerebro, que entonces decide si se come la planta.

Aunque los insectos representan la mayor amenaza para los vegetales, nuestros antepasados primates más antiguos también intentaban consumir las raíces, hojas y frutas que hallaban en los bosques tropicales donde vivían. Las plantas se convirtieron en alimento o medicina, pero también podían causar náuseas, vómitos o incluso la muerte.

Para adaptarnos, desarrollamos un sistema de prevención que consiste en informar a nuestro cerebro de la presencia de sustancias tóxicas. El gusto amargo de muchas plantas nos indica que debemos evitar o minimizar el consumo de algunas hojas, raíces o frutas. Al fin y al cabo, parece haber cierta justificación natural para que los niños rechacen el brócoli. Mientras que tales compuestos ayudan a ahuyentar a los insectos, a nosotros nos sirven para saber que debemos limitar su ingesta.

Los curanderos tradicionales aprendieron a base de ensayo y error, a veces con consecuencias mortales, que esas mismas plantas poseían aplicaciones medicinales importantes. Ahora, farmacólogos, toxicólogos y bioquímicos están confirmando que los compuestos vegetales que resultan tóxicos cuando se consumen en dosis altas pueden tener un efecto hormético (beneficioso para la salud) cuando son ingeridos en cantidades reducidas.

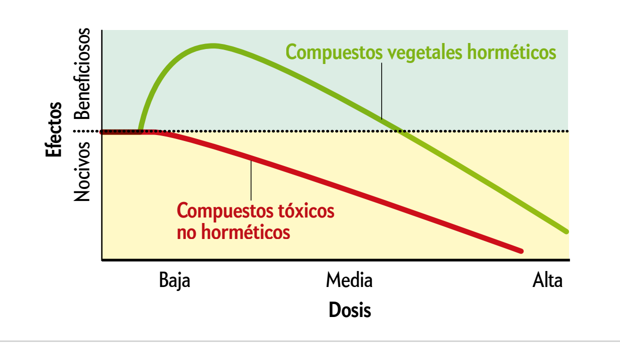
Si medimos los efectos horméticos de esas sustancias podemos observar lo que los científicos denominan una curva de respuesta bifásica. Al representar gráficamente los efectos en función de la dosis, aparece una línea en forma de U invertida. El ascenso inicial indica que comer una cantidad pequeña o moderada de un compuesto vegetal favorece la salud. El descenso gradual posterior revela la toxicidad que provoca el consumo creciente de estas sustancias. Ingerir demasiadas nueces de Brasil puede envenenar el hígado y los pulmones debido a la presencia del oligoelemento selenio, pero unas pocas de ellas nos proporcionan un nutriente esencial que se incorpora a una enzima que nos protege frente a cardiopatías y cáncer.

Los compuestos que inducen la respuesta moderada característica de la hormesis parecen hallarse muy extendidos en el mundo vegetal. Edward J. Calabrese, profesor de toxicología en la Universidad de Massachusetts Amherst, ha dedicado gran parte de su carrera a identificar las moléculas responsables de la hormesis. Durante tres décadas ha evaluado más de 10.000 estudios publicados en los campos de la biología, la toxicología y la medicina. Entre los compuestos analizados en estos estudios figuran la cafeína, los opioides y otras especies químicas con efectos en el cerebro. Calabrese creó una sociedad y una revista científicas dedicadas a la investigación de la hormesis. Dado nuestro interés común sobre el modo en que las células y los organismos han desarrollado respuestas a distintos tipos de estrés y su importancia para la salud humana, ambos publicamos un libro sobre el tema.

TOXICOLOGÍA

Primero beneficioso, después dañino

Las frutas y las verduras contienen a menudo bajos niveles de compuestos tóxicos. Estos resultan saludables cuando los consumimos en cantidades modestas, pero se vuelven nocivos a dosis altas, un proceso denominado hormesis. La disparidad de efectos, que se representa como una curva de respuesta bifásica, contrasta con la pauta observada para el mercurio y otras sustancias tóxicas no horméticas, que son perjudiciales incluso en cantidades bajas.



JEN CHRISTIANSEN

Algunos científicos están ahora revisando antiguos experimentos que parecían demostrar un efecto beneficioso de los antioxidantes de la fruta y la verdura en el cerebro y en la salud en general. Están valorando si la hormesis habría contribuido a los resultados positivos, en lugar de los antioxidantes. Esa evaluación y otro trabajo independiente parecen confirmar que el estrés celular inducido por los compuestos vegetales puede complementar o, en algunos casos, eclipsar la contribución de los antioxidantes. No es que se haya descartado su efecto. En vez de ello, se piensa que los procesos bioquímicos iniciados por el estrés hormético controlan cuándo los antioxidantes están disponibles para ser utilizados por las neuronas.

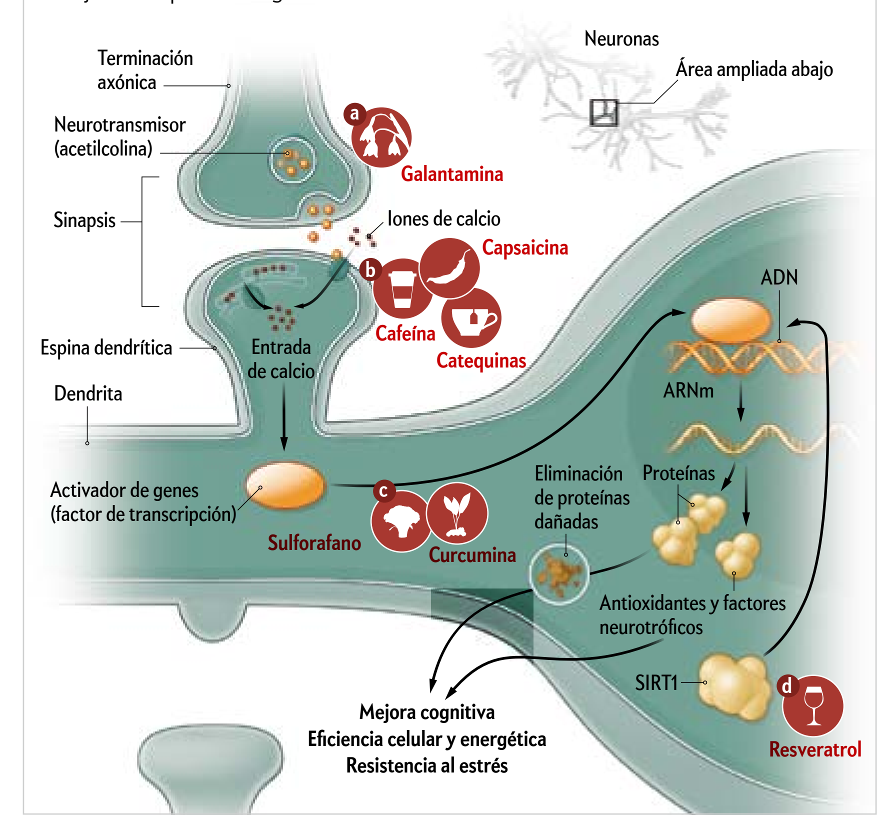
Un ejemplo del nuevo giro que ha dado la investigación viene del grupo de Gregory M. Cole, neurólogo en la Universidad de California en Los Ángeles. Hace más de una década el experto realizó un experimento con curcumina, un ingrediente habitual del curry, con el propósito de obtener un tratamiento contra el alzhéimer. Observó que, cuando proporcionaba curcumina a ratones modificados genéticamente para que presentaran los signos de esta enfermedad, estos sufrían menos daños neuronales a causa de los radicales libres y una menor acumulación de amiloide beta. Al principio, Cole pensó que la curcumina eliminaba los radicales libres, pero experimentos posteriores en mi laboratorio, entre otros, demostraron que la sustancia en realidad generaba un pequeño estrés en las células nerviosas. El estrés desencadena la producción de enzimas antioxidantes que reducen los radicales libres y evitan la acumulación de proteínas tóxicas. Los beneficios para la salud que aporta la curcumina parecen ser muy amplios [*véase* «Curcumina, ¿una especie sanadora?», por Gary Stix; Investigación y Ciencia, abril de 2007]. Otros estudios con animales sugieren que mitiga el daño por ictus e incluso tiene la capacidad de aliviar la depresión y la ansiedad.

Pero la curcumina no es el único ingrediente del curry con efectos beneficiosos para el cerebro. El ajo y los pimientos pi-

CÓMO NOS AYUDAN LOS COMPUESTOS VEGETALES

Una mayor resistencia celular

Se han descrito distintos mecanismos por los que algunos compuestos horméticos de las plantas actúan sobre rutas de señalización y mejoran el funcionamiento de las neuronas. La galantamina, extraída de las campanillas de invierno (*Galanthus*), eleva los niveles de acetilcolina (*a*), que se hallan reducidos en la enfermedad de Alzheimer. La acetilcolina se libera en el extremo de una neurona para luego asociarse a un sitio de unión en otra neurona, la espina dorsal dendrítica. La cafeína, la capsaicina de los pimientos picantes y las catequinas del té (*b*) actúan en los canales de la membrana celular; estos permiten la entrada de iones de calcio que activan la maquinaria de síntesis proteica (ADN y ARN). Dentro de la célula, el sulforafano del brócoli, la curcumina de la cúrcuma (*c*) y el resveratrol de las uvas (*d*) también promueven la actividad de los genes o de una proteína reguladora de genes (SIRT1). Esta cadena de acontecimientos bioquímicos produce antioxidantes o factores neurotróficos y elimina las proteínas dañadas. Todo ello aumenta la resistencia al estrés y la eficiencia energética celular y, lo que es más importante, mejora la capacidad cognitiva.



cantes contienen compuestos que abren ciertos canales en la membrana externa de las neuronas y dejan entrar iones de calcio. La apertura de los canales incrementa la actividad eléctrica de las neuronas, un estrés que en modelos animales parece proteger las células contra la hiperactividad que ocurre durante el ictus. Los habitantes de países en los que suele consumirse ajo y pimientos picantes tienden a mantener una función cerebral excelente al envejecer, aunque todavía está por ver si la causa son estos compuestos u otros aspectos de su dieta y estilo de vida.

En todos los estudios mencionados parece estar interviniendo la hormesis. Tal percepción aumenta más si cabe el complejo panorama de la interacción de los radicales libres con los antioxidantes. La curcumina no actúa neutralizando directamente los radicales libres, sino que recluta enzimas y otras tropas de reserva que ofrecen protección contra ellos. Este proceso tan cuidadosamente sincronizado explicaría por qué los suplementos de antioxidantes suelen mostrarse ineficaces o incluso nocivos, ya que al ingerirse en altas cantidades podrían inhibir la respuesta de estrés natural en todo el cuerpo. En 2009, un estudio de la Universidad Friedrich Schiller de Jena demostró que, después de un mes de practicar ejercicio físico y tomar suplementos de antioxidantes, un grupo de hombres no experimentó ninguna mejoría en la regulación de la glucosa sanguínea u otros indicadores de salud, mientras que los que solo hicieron ejercicio sí mejoraron. Por tanto, parece que los suplementos anulan la hormesis y los efectos ventajosos del ejercicio para la salud.

Poco a poco se van esclareciendo las rutas bioquímicas que promueven la resistencia del organismo ante los compuestos vegetales. En una de ellas intervienen dos proteínas, Nrf2 y Keap1, que suelen hallarse unidas en el citoplasma, la zona alrededor del núcleo de la célula. Cuando se expone estas proteínas a compuestos vegetales como la curcumina o el sulforafano, del brócoli, Keap1 se desprende de Nrf2, que a continuación se desplaza al núcleo; allí activa los genes que codifican las enzimas antioxidantes responsables de eliminar los radicales libres. El sulforafano estimula la ruta de Nrf2 para suprimir del cuerpo un exceso de radicales libres. En una placa de Petri, protege las células oculares contra el daño de la luz ultravioleta, que causa degeneración macular.

Esa conexión entre los compuestos vegetales y la ruta de Nrf2 también ha motivado mi propio trabajo. Hace unos siete años descubrí el libro *Insect antifeedant* («Repelentes de insectos»), escrito por Opender Koul, experto en plaguicidas de origen vegetal. En la obra se catalogaban más de 800 compuestos aislados de plantas, que las defienden de ser devoradas por insectos. En mi laboratorio obtuvimos unas 50 de esas sustancias repelentes, y en cultivos de neuronas evaluamos su capacidad de activar una o más rutas de señalización implicadas en la adaptación al estrés. Varios de estos compuestos activaban la ruta de Nrf2 y exhibieron la curva de respuesta bifásica característica de la hormesis. Descubrimos que la plombagina, un compuesto presente en cierta planta con flores tropical y en el nogal negro, reparaba con especial eficacia el daño cerebral y contribuía a la recuperación de un tipo de ratones que se emplea como modelo experimental de ictus. El próximo paso que nuestro grupo y otros estamos contemplando es ensayar compuestos neuroprotectores como el sulforafano y la plombagina en pacientes humanos.

TAMI TOLPA

Otro tipo de defensa celular fundamental la ofrece una familia de proteínas llamada sirtuinas. Leonard Guarente, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, demostró que una de las sirtuinas, SIRT1, alargaba la vida de células de levadura y ejercía un papel fundamental en el aumento de la longevidad por restricción calórica. El resveratrol, un compuesto que se halla en las uvas rojas y el vino, parece activar SIRT1, el cual, a su vez, activa múltiples rutas químicas que median efectos horméticos. En estudios con animales se comprobó que el resveratrol protege el cerebro y la médula espinal contra los efectos perjudiciales de la interrupción del riego sanguíneo que se produce en algunos tipos de ictus. Sin embargo, no todas las investigaciones aportan resultados positivos. Queda por determinar si una de las rutas activadas por el resveratrol acelera la muerte de algunas neuronas.

Esos estudios se han complementado con otros que demuestran que el momento en que una célula responde al estrés resulta fundamental para determinar si el efecto será beneficioso o perjudicial. Igual que se necesita alternar el ejercicio vigoroso (otro factor con efectos horméticos) con períodos de reposo para favorecer el crecimiento y reparación de las células, lo mismo parece suceder con el consumo de frutas y verduras. El cuerpo entra en un modo de resistencia al estrés caracterizado por una reducción general en la síntesis de proteínas nuevas, una mayor eliminación de moléculas dañadas y la producción de proteínas esenciales para la supervivencia de la célula.

Las células resisten ese estado solo durante cierto tiempo, hasta que necesitan fabricar nuevas proteínas para otros propósitos. En ese momento el estrés resulta excesivo y comienzan a deteriorarse. Cuando cesa el estrés, la síntesis proteica aumenta y las células pueden crecer y reparar el posible daño molecular que se haya producido. En el caso de las neuronas, se desarrollan nuevas interconexiones durante el período de recuperación. Algunos datos recientes indican que el consumo de frutas y verduras o el ejercicio físico alternado con períodos de descanso estimulan la formación de neuronas nuevas a partir de células madre del hipocampo, una estructura localizada en las capas más internas del cerebro. Estas neuronas nuevas crecen y establecen conexiones con otras ya existentes, lo que aumenta la capacidad de aprendizaje y memoria. En la práctica, un período normal de sueño nocturno debería bastar para que las células se recuperaran después del ejercicio o la exposición a los compuestos vegetales consumidos durante el día.

UN FÁRMACO PROMETEDOR

El conocimiento de la hormesis puede facilitar la búsqueda de nuevos fármacos y contribuir a explicar el mecanismo de acción de algunos medicamentos ya aprobados. Las flores de alhelí blanco (*Lucojum*) y de la campanilla de invierno (*Galanthus*) producen galantamina, un compuesto que mejora la memoria al aumentar los niveles de acetilcolina (molécula que interviene en las sinapsis, los puntos de comunicación entre las neuronas). La galantamina, un fármaco autorizado con un moderado efecto positivo sobre los síntomas de alzhéimer, crea un ligero estrés en las neuronas que parece protegerlas contra la neurodegeneración, al tiempo que mejora su capacidad para comunicarse con otras a través de señales químicas y eléctricas.

La exploración de plantas empleadas en la medicina tradicional podría aportar nuevas pistas para el desarrollo de medicamentos horméticos. Una sustancia conocida como *uwhangchungsimwon*, utilizada en la farmacopea coreana tradicional para tratar el ictus, protegería las neuronas al inducir una respuesta de estrés que da lugar a la síntesis de ciertas proteínas, como Bcl-xl, que evitan la muerte celular. Los compuestos vegetales alucinógenos también podrían ser de utilidad; en un ensayo clínico comparativo, su administración en dosis moderadas ha ofrecido resultados prometedores en el tratamiento de la ansiedad, la depresión y la drogadicción.

El concepto de hormesis, no obstante, ha despertado cierta controversia. Algunos investigadores dudan de si se han desarrollado los métodos adecuados para distinguir cuándo termina el efecto beneficioso y empieza el tóxico. El umbral exacto para determinarlo puede variar en función de la persona, lo cual dificulta el uso de la hormesis como base de las terapias farmacológicas. El escepticismo surge también cuando entre las estrategias terapéuticas se incluye la radiación ionizante, como los rayos X, que en dosis bajas ha demostrado ejercer efectos beneficiosos en animales de laboratorio sanos. Sin embargo, varios comités científicos consultivos han rechazado el uso de radiación en humanos por su falta de seguridad incluso a los niveles más bajos.

La evaluación de las posibles ventajas de la hormesis para la salud exigirá llevar a cabo ensayos clínicos aleatorizados exhaustivos, ya que numerosos tratamientos vegetales están en el mercado con afirmaciones infundadas sobre su eficacia. El Centro Nacional para la Medicina Complementaria e Integradora de EE.UU. fue establecido en 1998 en parte para ayudar a financiar estudios sobre tales compuestos.

Pero esas dificultades no deben frenar la investigación sobre la hormesis. Las sustancias vegetales que inducen un estrés celular pueden tener ventajas sobre los productos farmacéuticos tradicionales, que causan efectos secundarios al alterar el funcionamiento normal de las neuronas. El diazepam (Valium) actúa sobre ellas y reduce la ansiedad, pero también causa somnolencia. Este fármaco anula cierto circuito nervioso, que permanece inactivo hasta que los efectos del medicamento desaparecen. En la dosis apropiada, los medicamentos horméticos no perjudicarían la actividad nerviosa y conllevarían menos reacciones adversas.

En algunos laboratorios, incluido el nuestro, estamos tratando de desarrollar ese tipo de fármacos. Su aplicación en animales modificados genéticamente para que presenten síntomas de distintas enfermedades neurodegenerativas humanas está dando resultados prometedores. Los datos preliminares demuestran que estos compuestos protegen las neuronas contra la muerte y aumentan su capacidad para resistir el impacto de radicales libres y el daño molecular que hace estragos en el cerebro. Quizá la piel de la manzana, las nueces y el curry en polvo se conviertan en materias primas en una generación de tratamientos totalmente diferentes para las enfermedades cerebrales.

PARA SABER MÁS

Recruiting adaptive cellular stress responses for successful brain ageing. Alexis M. Stranahan y Mark P. Mattson en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 13, págs. 209-216, marzo de 2012.

Neurotrophic natural products: Chemistry and biology. Jing Xu, Michelle H. Lacoske y Emmanuel A. Theodorakis en *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 53, n.º 4, págs. 956-987, enero de 2014.

Mitohormesis. Jeanho Yun y Toren Finkel en *Cell Metabolism*, vol. 19, n.º 5, págs. 757-766, mayo de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nueva mirada a las plantas medicinales. Brendan Borrell en *IyC*, abril de 2015.

BIOLOGÍA

Vida bajo el hielo antártico

Un descubrimiento sorprendente obliga a los biólogos a reconsiderar la posible existencia de vida en los ambientes más inhóspitos de la Tierra y también en el espacio

Douglas Fox

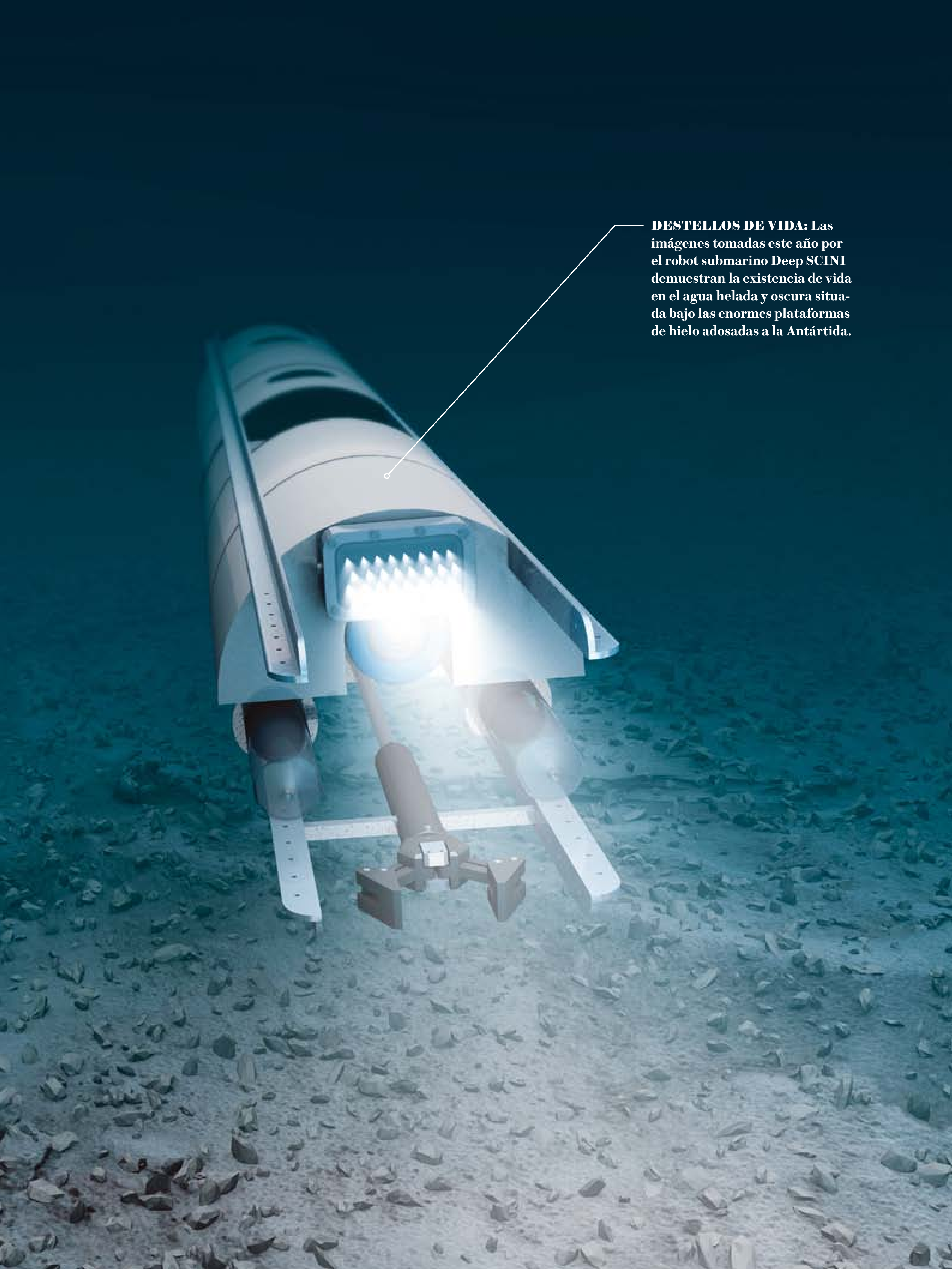
EN SÍNTESIS

El pasado enero, un grupo de glaciólogos perforó una capa de hielo de 740 metros de grosor en el punto donde el continente antártico se junta con el mar. Un robot enviado hasta el fondo del pozo descubrió peces y otros animales, en solo 10 metros de agua, a 850 kilómetros del mar abierto y de la luz solar.

El conocimiento tradicional sostenía que semejante lugar debía estar casi desprovisto de vida. Pero en esa zona, sin luz ni capacidad de realizar la fotosíntesis, los microorganismos utilizan fuentes de energía inusuales: los detritos que se desprenden de la capa inferior del hielo a medida que este se desliza sobre el agua. Los microbios sirven de alimento a diminutos anfípodos y estos, a su vez, a los peces.

El descubrimiento abre la posibilidad de que exista vida en lugares de la Tierra antes considerados inhabitables, así como en planetas y lunas similares a Europa.

BRYAN CHRISTIE



DESTELLOS DE VIDA: Las imágenes tomadas este año por el robot submarino Deep SCINI demuestran la existencia de vida en el agua helada y oscura situada bajo las enormes plataformas de hielo adosadas a la Antártida.

La costa de la Antártida occidental



Douglas Fox es periodista científico y ha publicado en *Discovery, Esquire, National Geographic* y *Nature*. La búsqueda de información para sus artículos le ha llevado a viajar en cuatro ocasiones a la Antártida desde 2007.

es uno de los lugares más desolados del planeta. A lo largo de mil kilómetros, bajo el campo de hielo de la Antártida occidental, yace una serie de glaciares interconectados, de una superficie similar a la de Europa occidental, que se deslizan lentamente desde el continente hacia el mar. A medida que el hielo abandona la tierra firme, se transforma en una plataforma flotante de centenares de metros de grosor que cubre cientos de kilómetros cuadrados de océano. La plataforma de hielo de Ross tiene una superficie equiparable a la de España y es tan vasta que una corriente marina tardaría entre tres y diez años en llevar una mota de plancton desde el mar abierto, donde la luz solar y el alimento abundan, hasta las tinieblas prohibidas de la costa sepultada bajo el hielo.



BAJO EL HIELO: Los investigadores acampados sobre la plataforma de Ross perforaron el pasado enero 740 metros de hielo para averiguar qué había en la zona de apoyo situada por debajo.

RACHEL MURRAY

Vida marina era lo último que Robert Zook y una docena de investigadores esperaban hallar el pasado enero cuando se embarcaron en una misión glaciológica en la zona donde el campo de hielo de la Antártida occidental se convierte en la plataforma de Ross. Habían viajado hasta ese remoto lugar para comprender cómo respondía al cambio climático la parte inferior del campo de hielo en su lento deslizamiento. Los acompañaban varios biólogos que pretendían estudiar posibles microbios rudimentarios, pero ninguno era especialista en organismos de mayor tamaño.

El 16 de enero, el grupo se apiñaba en torno a los monitores de vídeo de una oscura sala sobre el hielo, en el improvisado centro de control construido en el interior de un contenedor. Montado sobre esquís, los tractores lo habían arrastrado durante días, así como a medio millón de kilogramos de equipos y suministros, hasta alcanzar aquel lugar, situado a 850 kilómetros del borde marino de la plataforma. Habían empleado agua caliente para perforar, a través de 740 metros de hielo, un pozo de diámetro algo mayor al de una canasta de baloncesto, hasta alcanzar la minúscula capa de agua situada debajo, frente a la costa sepultada bajo el hielo. A continuación, habían colgado de una grúa el robot bautizado Deep SCINI y lo habían hecho descender lentamente por el pozo, conforme un cable eléctrico se desenrollaba para mantenerlo conectado con la sala de control.

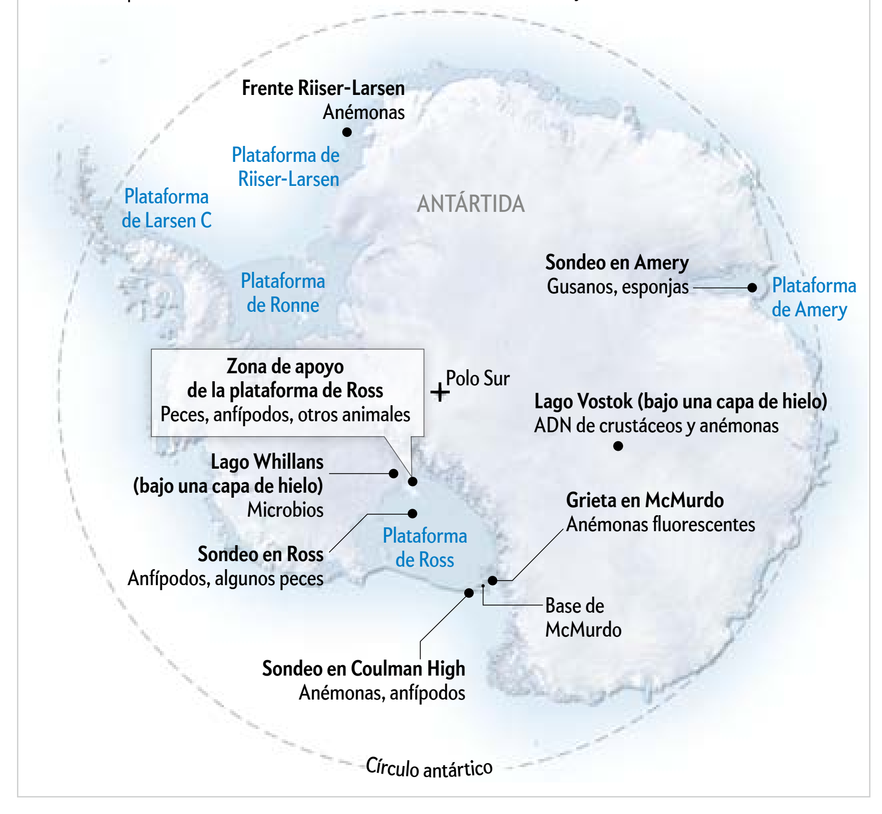
Zook había trabajado duro y a toda prisa para diseñar y construir Deep SCINI de modo que pudiera resistir el frío intenso y las presiones elevadas de las profundidades. Pero solo había tenido tiempo para ensayar el vehículo operado a distancia en una piscina. La tripulación observó durante 40 angustiosos minutos cómo el delgado robot, de dos metros de longitud, descendía hacia el vacío. El rayo de luz proyectado por el foco situado en el morro del vehículo producía brillantes destellos en las paredes del pozo, lo que hacía pensar en un agujero de gusano cósmico que llevaba a otro mundo.

Los investigadores, hacinados en la sala, suspiraron al unísono cuando de repente el pozo dio paso a una oscuridad vacía. Deep SCINI había atravesado la base de la capa de hielo para entrar en la cámara de agua marina de 10 metros de profundidad situada debajo. Ante ellos apareció el fondo marino desnudo, rocoso y desprovisto de vida, una zona fría y oscura nunca antes vista por ojos humanos. Las muestras de agua que el equipo ha-

DESCUBRIMIENTOS

Bajo las plataformas heladas

El pasado enero, los investigadores quedaron atónitos al hallar numerosos peces y anfípodos (pequeños animales con esqueleto) allí donde la plataforma de Ross permanece anclada al continente (zona de apoyo), a 850 kilómetros del mar abierto y 740 metros bajo el hielo. En el pasado se habían descubierto otros animales bajo los bordes exteriores de las plataformas de hielo de la Antártida, como se indica en la imagen, mucho más cerca de las aguas iluminadas por el sol, a menudo colgando desde la parte inferior del hielo en un mundo cabeza abajo.



XNR PRODUCTIONS

bía subido hasta la superficie en los días previos eran cristalinas, carentes de cualquier signo de vida. Ross Powell, glaciólogo de la Universidad del Norte de Illinois y codirector de la expedición, describió la zona de apoyo de la plataforma como «bastante inhóspita» cuando habló por teléfono vía satélite tras la obtención de aquellas muestras.

El piloto del robot, Justin Burnett, deslizó sus dedos sobre una almohadilla sensible para guiar a Deep SCINI hacia arriba, en dirección a la parte inferior de la plataforma flotante. Las luces del vehículo mostraron un techo de hielo irregular, oscuro e incrustado de cieno. Aquí y allí, se desprendían motas del techo, centelleando en el haz de luz a medida que se hundían. A veces, alguna de ellas se comportaba de modo extraño; parecía saltar hacia un lado. Nadie podía estar seguro, pero en el vídeo daba la impresión de que algo se hubiera movido.

Burnett empezó a orientar a Deep SCINI de vuelta hacia el fondo marino cuando de repente el vídeo se detuvo. El robot se había apagado para evitar sobrecalentarse, algo inaudito en aquella agua, que, a –2 ºC, se mantenía líquida solo debido a la salinidad y a la extrema presión ejercida por el hielo situado por encima. Zook llamó por radio al operador de la grúa para que hiciera descender el robot hasta el fondo mientras los investigadores lo reiniciaban.

Cuando las cámaras de vídeo volvieron a funcionar, alguien en el interior del frío contenedor gritó: «¡Mirad, mirad, mirad! ¡Imposible!». Todos las miradas se volvieron a la izquierda, hacia el monitor de la cámara. Una forma delicada se deslizó a lo largo de la pantalla; con un extremo posterior afilado, aquel cuerpo translúcido parecía un signo de exclamación de color azulado, parduzco y rosado. Era un pez del tamaño de un cuchillo de untar. La habitación se llenó de gritos entrecortados. Aquel equipo estaba allí para investigar los glaciares y acababa de descubrir vida compleja en uno de los lugares supuestamente más inhóspitos de la Tierra.

El robot permaneció allá abajo durante seis horas aquel día y encontró tres tipos diferentes de peces, en total 20 o 30 ejemplares. Anfípodos con aspecto de gamba revoloteaban por todas partes. La tripulación vio una medusa teñida de marrón y un cuerpo iridiscente nadando por encima que podría ser un ctenóforo. «Tenías la sensación de que allí vivía una comunidad», me dijo poco después Powell. «No fue un simple golpe de suerte.» Las profundidades desoladas de repente bullían de vida.

El objetivo de la misión cambió de inmediato. De ser posible, se capturarían animales para que los investigadores pudieran estudiarlos luego. Durante los días posteriores, Zook acopló a Deep SCINI una trampa improvisada confeccionada con un trozo de cortina y cebada con pescado. Cuando el robot descendió nuevamente hacia el fondo marino, su cámara observó durante cuatro horas docenas de anfípodos reptando hacia la trampa, como moscas revoloteando alrededor de un cubo de basura. Cuando el operador de la grúa lo izó de nuevo, la trampa contenía más de 50 anfípodos. El equipo congeló los diminutos crustáceos y voló de nuevo a la base de McMurdo, el principal centro logístico de los Estados Unidos en la Antártida, desde donde Zook y el resto de los investigadores iniciarían el viaje de regreso.

Descubrir vida compleja en semejante abundancia provocó una enorme conmoción. El eco del descubrimiento aún resuena en la comunidad científica, pues ha hecho tambalear el conocimiento sobre la vida en nuestro planeta y sobre las posibilidades de hallarla en otros mundos.

Las pruebas sobre la existencia de vida bajo el hielo antártico se han obtenido con lentitud. El clima es extremo y las expediciones son caras, especialmente si exigen perforar centenares de metros de hielo. Por este motivo, la mayoría de los datos registrados procede de los bordes de las plataformas de hielo, situadas cerca del mar abierto.

En la década de los sesenta del siglo xx, los glaciólogos tropezaron con una colonia de focas que de algún modo habían logrado sobrevivir varadas en el interior de la plataforma de hielo de McMurdo, a 25 kilómetros del borde de esta, demasiado lejos

como para nadar por debajo hasta el mar abierto. Los animales se concentraban junto a una profunda grieta, donde la plataforma de hielo permanecía abierta, y se sumergían en ella para alimentarse. Los biólogos se preguntaron qué podían comer las focas en aquellas oscuras y desoladas aguas, entre otras cosas porque parecían estar más gordas que sus parientes con acceso al mar abierto; sin embargo, no lograron dar con la respuesta.

En 1975 se obtuvo una pista por casualidad, cuando unas nubes bajas obligaron al helicóptero de John Oliver a aterrizar en las proximidades de la grieta. Oliver, por entonces en la Institución Scripps de Oceanografía en La Jolla, California, y su acompañante decidieron bucear en la fractura. Descendieron por una pared de hielo y, a 40 metros de profundidad, vieron algo extraño: cientos de anémonas de color verde fluorescente ancladas en el hielo. Un año después regresaron para muestrear las anémonas, pero en el agua se arremolinaban cristales de hielo y tuvieron que abandonar sus planes sin recolectar, o siquiera fotografiar, un solo animal. Su descubrimiento quedó reducido a una única frase escondida en un artículo sobre glaciares.

En 2003, Yuuki Watanabe, biólogo de la Universidad de Tokio, se hallaba acampado a 3000 kilómetros de allí, sobre una delgada capa de hielo estacional cercano a la plataforma de Riiser-Larsen. El hielo, formado durante el invierno por la congelación del agua marina más allá del borde de la plataforma, le permitió permanecer en el lugar y estudiar los hábitos alimentarios de las focas. Los instrumentos fijados en los animales revelaron que a menudo se sumergían hasta los 150 metros de profundidad, donde supuso que se concentrarían los peces. Pero al colocar una cámara a una de las focas, las fotografías revelaron una gran sorpresa: animales dotados de tentáculos ondulantes colgaban cabeza abajo de la parte inferior de la plataforma. Watanabe razonó que las focas buceaban hasta el borde de la plataforma para alimentarse de lo que allí colgaba.

Cuando Zook fue contratado en 2010 para que trajera un vehículo operado a distancia que ayudara a los ingenieros a ensayar un taladro de agua caliente en Coulman High, un punto sobre la plataforma de Ross alejado 10 kilómetros del frente de la plataforma y con un grosor de 250 metros, pocos conocían lo que Oliver y Watanabe habían entrevisto. El equipo derritió el hielo para realizar un sondeo y Zook envió su robot hacia las profundidades. A medida que se desplazaba bajo el hielo, algo extraño apareció en el monitor de vídeo: tentáculos fantasmagóricos, los brazos de cientos de anémonas que suelen hallarse sujetas al fondo marino. Pero allí colgaban cabeza abajo, con sus columnas enterradas en el hielo. En otros rincones de la placa habitaban gusanos. Anfípodos y krill, ambos con aspecto de gambas, revoloteaban en el agua. Un ejemplar de krill nadaba de espaldas, con su barriga rozando el techo helado. Aquella observación accidental resultaba insólita, según Zook. «No existía ninguna expectativa de que aquello pudiera suceder.»

Marymegan Daly, especialista en anémonas de la Universidad estatal de Ohio, quedó estupefacta al ver las primeras fotografías. «Sufrí una sacudida. Parecían murciélagos colgados del techo de una cueva», explica. «Nunca pensé que las anémonas pudieran vivir allí.»

Nadie había imaginado un ecosistema cabeza abajo en la parte inferior de una placa de hielo. Pero los científicos podían al menos hacer encajar su existencia sirviéndose de los conocimientos de la época. La vida compleja presente bajo el borde de la plataforma prospera gracias al agua marina arrastrada hasta allí desde la zona iluminada del océano próximo, razonaban los biólogos. Pero la vida debía disminuir con rapidez hacia la parte interior, más alejada de la luz solar. Organismos cada vez menores consumirían los escasos alimentos hasta que no quedara nada, lo que daría paso a una enorme región habitada únicamente por microorganismos. Esta se extendería a lo largo de cientos de kilómetros bajo plataformas de hielo del tamaño de países y finalizaría en la zona de apoyo.



¡UN PEZ!: Bob Zook (*izquierda*) mira con atención el vídeo enviado por su robot, sumergido en una bolsa de agua en la zona de apoyo. No esperaba encontrar vida visible, por lo que se llevó una buena sorpresa cuando descubrió tres especies de peces, algunos translúcidos y del tamaño de un cuchillo de untar (*derecha*).

Esa zona se halla muy alejada de la luz solar y de la posibilidad de que en ella exista la fotosíntesis. Anteriormente, las regiones del fondo marino más desiertas que la humanidad hubiera visitado eran las oscuras llanuras abisales situadas bajo 6000 metros de agua en el centro de los océanos. La vida a esas profundidades depende de fragmentos de fitoplancton muerto que se hunden desde las capas iluminadas situadas mucho más arriba. Stacy Kim, ecólogo especializado en bentos antártico de los Laboratorios Marinos Moss Landing, de California, esperaba que dicha zona estuviera aún más aislada que los abismos.

En 2013, la Oficina Científica ANDRILL, de la Universidad de Nebraska-Lincoln, que había financiado la expedición de 2010, contrató a Zook para construir un robot más avanzado, finalmente bautizado como Deep SCINI. Las ventanas de las cámaras se construyeron con zafiro y la carcasa a partir de millones de diminutas esferas huecas de cristal, capaces de resistir la presión del agua a 1000 metros y así poder acceder a la zona situada bajo las partes más gruesas y remotas de las plataformas de hielo. Zook fue luego invitado a llevar a Deep SCINI a la expedición liderada por Powell, un esfuerzo sin precedentes para perforar en la zona de apoyo.

A sus 53 años, Zook no encaja en el perfil típico de explorador científico. Nunca finalizó los estudios de secundaria. Pasó varios años diseñando los primeros teléfonos inalámbricos, antes de empezar a trabajar en 1997 en el mantenimiento de los repetidores de radio y de las balizas para navegación aérea de la base de McMurdo. Zook y Burnett, graduado en robótica, emplearon seis meses para completar Deep SCINI, pasando quince horas diarias en un sudoroso hangar de ladrillo en Lincoln. Deep SCINI había sido financiado solo como un prototipo, no para una exploración real. Cuando llegaron al campamento de perforación, el 2 de

RACHEL MURRAY



enero de 2015, al robot aún le faltaban el sistema de navegación y un sistema de gestión del consumo eléctrico, lo que lo hacía vulnerable al sobrecalentamiento.

Tras el descubrimiento del pez, Deep SCINI fue izado a la superficie, se le retiró un conjunto de instrumentos oceanográficos de Powell y fue aparcado en el fondo marino durante 20 horas. Allí midió las corrientes marinas y la salinidad, datos que podían aportar indicaciones sobre la velocidad a la que se fundía el hielo. También determinó la concentración de oxígeno y de otros compuestos químicos, algo ahora crucial a la luz de los acontecimientos. Mientras tanto, los peces y los anfípodos no dejaron de visitar la cámara.

Los investigadores del campamento se esforzaban por entender la presencia de animales. Brent Christner, microbiólogo de la Universidad estatal de Luisiana que ha estudiado los microbios de la Antártida durante 15 años, se preguntaba de qué se alimentarían. La luz solar se hallaba demasiado alejada, y el agua del frente de la plataforma que pudiera llegar habría perdido durante su lenta migración todo el alimento que pudiera contener.

La magnitud del misterio aumentaba aún más al considerar las enormes necesidades energéticas de los peces en comparación con las de los microbios. Los peces requieren una pirámide trófica de varios niveles. En la base, los microorganismos utilizan la energía solar o de compuestos inorgánicos para extraer moléculas de dióxido de carbono del agua y poder crecer. Los anfípodos comen microbios y reciclan el carbono. Los peces, en la cumbre, se alimentan de anfípodos. Esta forma de transferir carbono, o energía, hacia la cima de la pirámide trófica es poco eficiente, afirma John Priscu, ecólogo microbiano de la Universidad estatal de Montana que ha codirigido la expedición de este año. Se necesitan 100 kilogramos de microbios para mantener a un kilogramo de peces.

El misterio también rodea al millón de kilómetros cuadrados de tierra oculta bajo el campo de hielo de la Antártida occidental. Los glaciólogos han perforado varios pozos a través del hielo para llegar al fango situado debajo. Este es rico en caparazones microscópicos de diatomeas que vivieron hace entre 5 y 20 millones de años, prueba de que la zona estaba cubierta por un mar poco profundo en períodos más cálidos. La cartografía sísmica muestra capas de sedimentos antiguos de varios centenares de metros de grosor, formados por miles de millones de toneladas de organismos marinos en descomposición tras haber muerto y depositarse en el lecho marino.

A principios de 2013, el mismo equipo científico que el pasado enero perforó un pozo hasta la zona de apoyo había excavado otro unos 100 kilómetros tierra adentro y había alcanzado un acuífero subglacial llamado lago Whillans. (Tuve la ocasión de acompañarlos en esa expedición.) El carbono orgánico de origen marino representaba el 0,3 por ciento del sedimento del lago, una cantidad sorprendente y similar a la que hay en los herbazales desérticos de Norteamérica. El equipo también descubrió microbios. Sin luz solar ni fotosíntesis, estos utilizaban el oxígeno del lago para «quemar» compuestos químicos como el amonio y el metano liberados por la descomposición de las capas inferiores. ¿Quizá los peces de la zona de apoyo se alimentaban del mismo tipo de recursos?

A medida que Deep SCINI descendía por el pozo, las paredes heladas se volvían opacas y parduzcas antes de que el robot alcanzara la cavidad llena de agua. Los últimos veinte metros de hielo estaban repletos del mismo tipo de residuos ricos en carbono hallados en el lago Whillans, material que se había congelado en la cara inferior de los glaciares al arrastrarse estos sobre la tierra durante millones de años.

Fragmentos de ese sedimento iban desprendiéndose del techo del hielo a medida que Deep SCINI exploraba la cavidad submarina. Cada año se funde alrededor de un milímetro de la parte inferior del hielo, proceso en el que se liberan partículas ricas en nutrientes. Priscu se percató de que los anfípodos formaban ávidos enjambres en torno a las nubes de residuos que se levantaban del fondo del pozo cada vez que el robot perturbaba las paredes. Se preguntaba si la capa de hielo que impedía la llegada de luz solar en el lugar podía suministrar los detritos que alimentaban a los microbios en la base de la red trófica. Estaba seguro de que los peces obtenían su alimento desde arriba.

En opinión de Priscu, los glaciares que fluyen de la tierra al mar a través de la zona de apoyo actuarían como una lenta cinta trasportadora de hielo rico en residuos que empieza a fundirse al entrar en contacto con el agua marina, espolvoreándola con detritos. El hielo sucio se funde lo bastante rápido como para haber liberado toda su carga cuando ha penetrado unos 40 kilómetros en el mar. Esta lluvia local de sedimento puede ayudar a fertilizar el agua marina, lo que contribuye a crear una región habitable en la parte posterior de la plataforma de hielo, afirma Slawek Tulaczyk, glaciólogo de la Universidad de California en Santa Cruz que codirige junto a Powell y Priscu la expedición de este año.

Ese hábitat aislado podría resultar frecuente. La Antártida se halla rodeada por más de 200.000 kilómetros cuadrados de zona de apoyo, ocultos bajo el hielo flotante. Imaginemos por un momento que observásemos la Antártida desde el espacio. Bajo el hielo, percibiríamos un anillo de cuarenta kilómetros de ancho alrededor de la costa habitado por peces y otros animales, un vasto y vibrante ecosistema, en lugar de un espacio muerto.

Las vastas extensiones de oscuro océano cubierto de hielo situadas entre esos oasis y el mar abierto podrían también contener algunos animales. En 1977, se perforó un único pozo en la plataforma de Ross, a 475 kilómetros del mar abierto y sobre una columna de agua de 240 metros. Una cámara sumergida a través del sondeo captó centenares de fotografías del fondo marino y en dos de ellas parecían advertirse peces. También se vieron anfípodos. «En esa ocasión no se les prestó mucha atención», comenta Kim. Pero aquellas observaciones antiguas parecen más relevantes ahora que se han descubierto peces en una región mucho más apartada, la zona de apoyo.

CORTESÍA DEL PROYECTO DE PERFORACIÓN DEL ARROYO SUBGLACIAL WHILLANS

Pero el hallazgo de vida bajo el hielo puede resultar todavía más fascinante. Imágenes recientes tomadas a través del hielo mediante radares a bordo de aviones, que pueden cartografiar en tres dimensiones la estructura de las plataformas de hielo, demuestran que el agua procedente del deshielo, menos salada, flota sobre el agua marina y fluye alejándose de la región de apoyo en forma de plumas de cientos de kilómetros. «Estamos hablando de un río invertido», afirma David Holland, oceanógrafo de la Universidad de Nueva York. Este río funde canales en el hielo de 5000 a 3000 metros de anchura y 200 metros de profundidad. Si transportara detritos procedentes del deshielo, podría alimentar a los organismos presentes en los canales.







UN MUNDO DEL REVÉS: En 2010 también se hallaron animales inesperados bajo la barrera de hielo de la plataforma de Ross (*arriba*). En lugar de fijarse al fondo marino, las anémonas (*derecha*) estaban sujetas a la parte inferior del hielo, desde donde crecían hacia abajo. Otros animales pululaban por allí, incluido un ser desconocido apodado «rollo de huevo» (*izquierda*).

El interés por la vida en los ambientes remotos de la Tierra no ha hecho más que aumentar después de que los biólogos estudiasen las fotografías y los especímenes recolectados por Zook, así como las anémonas colgantes recogidas en 2010 en Coulman High (aunque los datos no se hicieron públicos hasta 2013, tras una larga demora). La realidad no deja de sorprender: los habitantes de lugares extremos resultan de una vulgaridad pasmosa. «El hábitat es de lo más raro», comenta Daly, «pero los animales son de lo más común».

Las anémonas, por ejemplo, pertenecen a una familia bien conocida, de distribución mundial. «No hay nada extraordinario en ellas desde el punto de vista anatómico», afirma Daly; ninguna glándula nueva u otro órgano capaz de explicar cómo se fijan al hielo sin congelarse. Podrían sobrevivir concentrando sal en torno a sus cuerpos, pues la sal actúa como anticongelante. Sin embargo, Daly ha observado una adaptación relevante: los huevos son muy grasos, así que flotan hasta el techo de hielo, en lugar de hundirse hacia el fondo marino.

Los anfípodos rojos con aspecto de gamba descubiertos el pasado enero parecen pertenecer a un grupo bien conocido, propio de los fondos abisales de todo el mundo. Son «carroñeros voraces», en palabras de Kathleen Conlan, bióloga marina del Museo Canadiense de la Naturaleza en Otawa. «Si en la Antártida hubiera materia orgánica en los residuos procedentes del hielo que estimulara el crecimiento microbiano, estos anfípodos podrían estar aprovechándola.»

El pez azul, marrón y rosa fue identificado a partir de las fotografías. Arthur DeVries, ictiólogo de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign que ha estudiado los peces antárticos durante 50 años, lo identificó como un diablillo antártico, una de las especies más abundantes en aguas costeras del continente. Irónicamente, se trata de un pez vulnerable a la congelación.

Hallar esas especies anodinas sugiere una profunda verdad: los ambientes más remotos e inexplorados podrían no resultar tan extremos como suponíamos. «Siempre hemos pensado que comprendíamos el funcionamiento del planeta», afirma Britney Schmidt, científica planetaria del Instituto de Tecnología de Georgia. El descubrimiento de enero nos demuestra lo ingenuos que éramos, afirma. «Para mí, esta es la verdadera lección.»

De hecho, se ha encontrado vida compleja en todos aquellos lugares antes considerados inhabitables. A menudo, basamos la habitabilidad en la presencia de agua líquida, tanto en la Tierra como en otros planetas o lunas. Schmidt lo ve de otro modo y se fija en la energía de origen geológico; por ejemplo, allí donde las placas tectónicas o los glaciares ponen al alcance de los seres vivos carbono que lleva años enterrado y puede ser consumido de nuevo. «Estos ciclos pueden alimentar la vida», afirma.

Otros hallazgos recientes refuerzan esa forma de pensar. En los fondos marinos del golfo de México se han observado enjambres de gusanos asociados a afloramientos de hidratos de metano, una forma exótica de gas natural sólido que se origina a presiones elevadas. A pesar de vivir en un lugar tan insólito, la dieta de los gusanos es la habitual: bacterias, que, a su vez, consumen el hidrato de metano. En el agua que borbotea a través de grietas rocosas situadas a tres kilómetros por debajo de la superficie terrestre, se han hallado varias especies de gusanos que se alimentan de los microorganismos que consumen los minerales del lecho rocoso. Algunos microbios de las profundidades viven, en cierto modo, de la energía nuclear, pues consumen el hidrógeno producido por la desintegración del uranio y otros elementos radiactivos.

Y por último, está el lago Vostok, situado en la Antártida oriental, 1500 kilómetros tierra adentro del lugar donde se perforó el pasado enero. Vostok se halla bajo 3700 metros de hielo, aislado del aire y la luz solar desde hace 15 millones de años. En los años noventa, investigadores rusos perforaron el hielo y, sin llegar al lago, obtuvieron hielo de la capa que lo cubría. Respetados biólogos polares reaccionaron con escepticismo, e incluso se burlaron, cuando Scott Rogers, biólogo de la Universidad de Bowling Green, en Ohio, analizó en 2013 el ADN presente en dicho hielo y afirmó que correspondía a organismos acuáticos, como anémonas y crustáceos, que podrían habitar el lago.

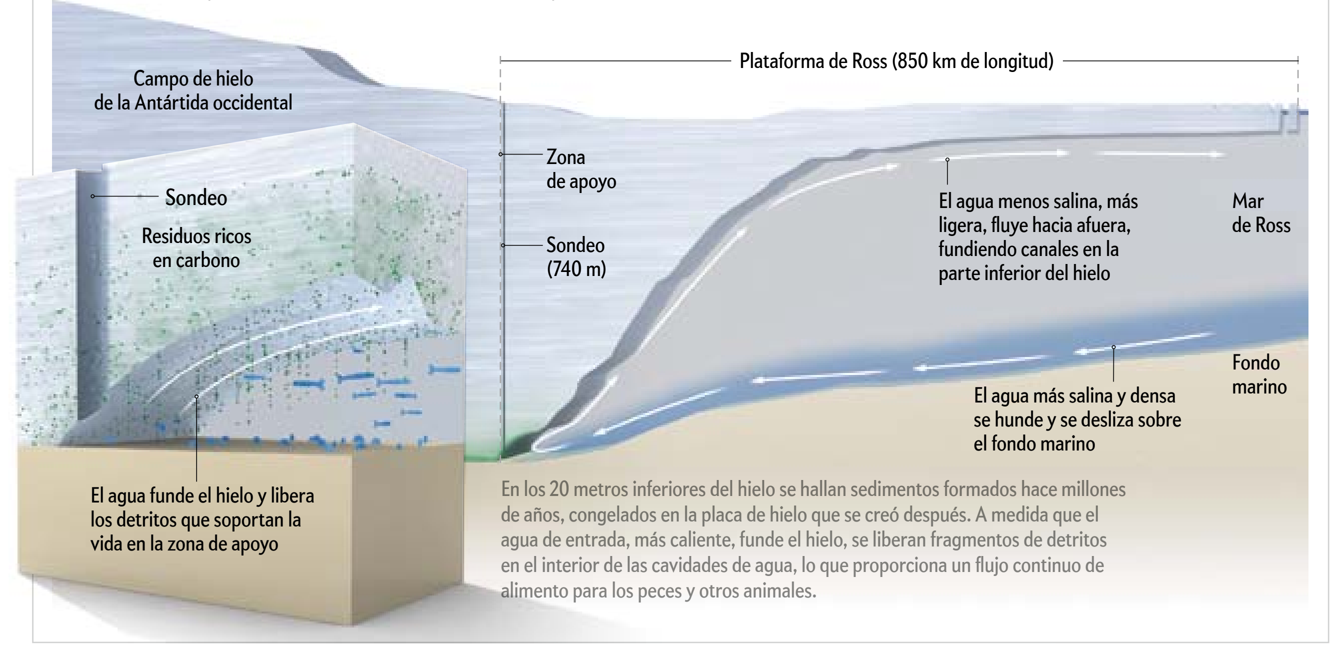
«Creo que debemos mantener la mente abierta» sobre los estudios de Rogers, afirma Tulacyzk. A pesar de estar enterrado

BEN CRANKE, GETTY IMAGES (*plataforma de hielo*); CORTESÍA DE LA OFICINA CIENTÍFICA ANDRILL, UNIVERSIDAD DE NEBRASKA-LINCOLN (*rollo de huevo y anémonas*)

NUTRIENTES CONGELADOS

Peces que se alimentan de detritos de tiempos remotos

El enorme campo de hielo de la Antártida occidental se desliza lentamente desde la tierra hacia el mar, donde se transforma en una plataforma de hielo flotante (*derecha*). La transición se produce en la llamada zona de apoyo. El agua salada, densa, fluye hacia la zona de apoyo, donde funde el hielo y crea pequeñas cavidades; permanece líquida a –2 °C debido a la enorme presión generada por los 740 metros de hielo situados por encima. Los científicos suponían que dicha cavidad estaría prácticamente desprovista de vida al hallarse alejada unos 850 kilómetros del mar abierto y de la luz del sol, la cual resulta necesaria para los microorganismos que soportan la red trófica. Pero en enero, un grupo de investigadores halló peces y otros seres vivos complejos que parecen alimentarse de sedimento desprendido del hielo (*inserto, abajo y a la izquierda*).



BRYAN CHRISTIE

a tanta profundidad, Vostok seguramente contiene cantidades importantes de oxígeno, que se incorporaría al lago a través de las burbujas de aire antiguo presentes en el hielo.

Un proceso similar podría operar en Europa, una luna cubierta de hielo que orbita en torno a Júpiter, en la que se cree que podría existir un océano de agua líquida bajo 10 o 20 kilómetros de hielo. Schmidt y otros han hallado pruebas de fuertes corrientes en el interior de Europa, provocadas por mareas y por el calor de rozamiento interno generado por Júpiter. Si estas corrientes calentaran y fundieran la parte inferior del hielo, el proceso podría alimentar un ecosistema similar al del lago subglacial Whillans o al de la región de apoyo en la Antártida. Las corrientes cálidas podrían generar una especie de tectónica de placas, en la que la superficie helada de Europa se reciclaría en el interior del océano y le aportaría así un flujo constante de oxígeno y otros compuestos.

El descubrimiento de animales en la zona de apoyo plantea numerosas cuestiones. Powell intenta estimar las corrientes y el calor que afectan a dicha zona, lo que revelará la velocidad con la que se funde el hielo y se libera nuevo alimento. La sarta de instrumentos colocados por Tulaczyk en la perforación aportarán más información sobre las corrientes, una vez el pozo se vuelva a congelar, pues registrarán la inclinación de la plataforma a causa de las mareas diarias, una información a la que se podrá acceder gracias a una conexión vía satélite. Priscu y Christner diseccionarán los anfípodos y usarán métodos moleculares para analizar el contenido de sus tubos digestivos y así identificar sus presas. También analizarán el ADN de los microorganismos del agua y del sedimento para determinar las fuentes de energía que sustentan la red trófica, trátese de amonio, azufre u otros compuestos.

Powell espera regresar a la zona de apoyo con un vehículo operado a distancia de mayor tamaño, dotado de mayor capacidad para explorar bajo el hielo, obtener imágenes y analizar compuestos en el agua. Zook espera recolectar algunos peces vivos y otros animales. Pero, por el momento, está satisfecho con el modo en que Deep SCINI se desenvuelve. «En la Antártida, ningún nuevo proyecto tecnológico relevante funciona el primer año», me explicó mientras empaquetaba el material en enero. El éxito de Deep SCINI fue un pequeño milagro.

PARA SABER MÁS

A microbial ecosystem beneath the west Antarctic ice sheet. Brent C. Christner et al. en *Nature*, vol. 512, págs. 310-313, 21 de agosto de 2014.

Los descubrimientos sobre la vida bajo el hielo de la Antártida pueden seguirse en la página web del Programa de Perforación del Arroyo Subglacial Whillans: **www.wissard.org**

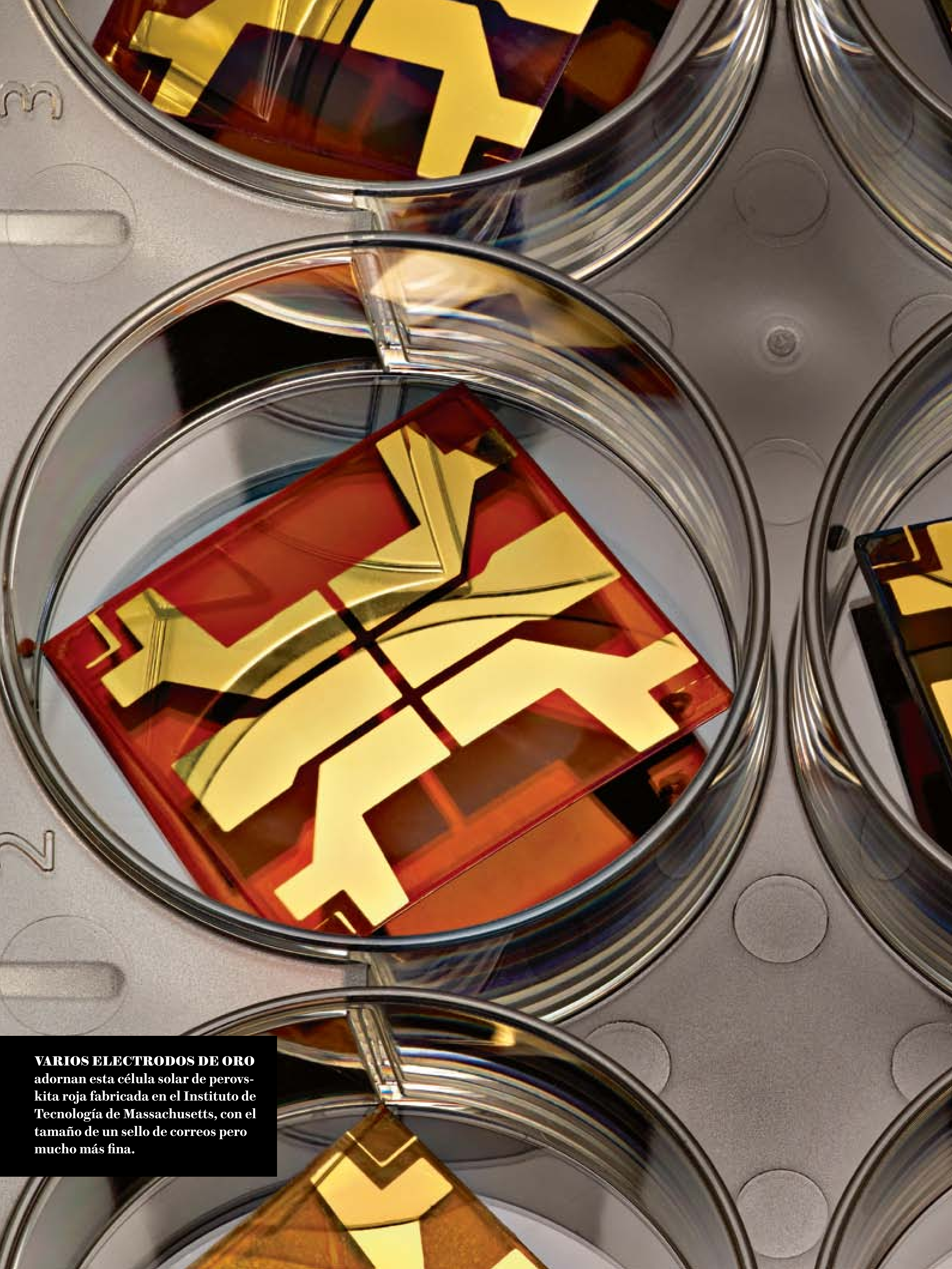
EN NUESTRO ARCHIVO

Peces antárticos. Joseph T. Eastman y Arthur L. DeVries en *IyC*, enero de 1987.

Ecosistemas microbianos antárticos. Josefina Castellví, Ramón Fontarnau y Jesús Guinea en *IyC*, febrero de 1992.

La vida en los fondos antárticos. Josep Maria Gili, Covadonga Orejas y Joandomènec Ros en *IyC*, noviembre de 2000.

La fusión de la Antártida en directo. Douglas Fox en *IyC*, septiembre de 2012.



VARIOS ELECTRODOS DE ORO adornan esta célula solar de perovskita roja fabricada en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, con el tamaño de un sello de correos pero mucho más fina.

ENERGÍA

Placas solares de perovskita

Un material en alza tal vez permita fabricar células solares más baratas y eficientes que las basadas en silicio

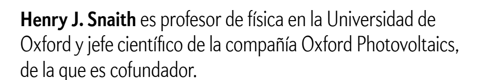
Varun Sivaram, Samuel D. Stranks y Henry J. Snaith

En Japón, sentado en un bar en penumbra al caer la noche, el entonces estudiante de posgrado Michael Lee garabateaba en un posavasos de cerveza una lista de compuestos químicos antes de que se le olvidaran. Ese mismo día, un grupo de científicos de la Universidad Toin de Yokohama habían compartido generosamente con él una receta para construir dispositivos fotovoltaicos basados en perovskita, un material novedoso que sustituía al silicio tradicional. Sin embargo, aquellas células solo convertían el 3,8 por ciento de la luz solar en electricidad, por lo que habían pasado desapercibidas para el mundo. Pero Lee estaba inspirado. Tras aquella misión de acopio de datos, en 2011, regresó al Laboratorio Clarendon de la Universidad de Oxford, donde los tres trabajábamos en esa época, y llevó a cabo una serie de modificaciones que dieron lugar a la primera célula solar de perovskita con una eficiencia de conversión superior al 10 por ciento. Su invención desencadenó el equivalente a una fiebre del petróleo en el área de las energías limpias. En los años siguientes, investigadores de todo el mundo se lanzaron a desarrollar células de perovskita más eficientes.

FOTOGRAFÍAS DE PLAMEN PETKOV; MUESTRAS SUMINISTRADAS POR MATTHEW T. KLUG, BELCHER GROUP Y ANNA OSHEROV, BULOVIC GROUP, INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE MASSACHUSETTS

Varun Sivaram es miembro del Consejo de Relaciones Exteriores de Estados Unidos. Investiga sobre energía, tecnología y seguridad nacional.

Samuel D. Stranks trabaja en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde estudia las aplicaciones ópticas y eléctricas de las perovskitas.



Henry J. Snaith es profesor de física en la Universidad de Oxford y jefe científico de la compañía Oxford Photovoltaics, de la que es cofundador.

En noviembre de 2014, el Instituto de Investigación en Tecnología Química de Corea estableció un nuevo récord al lograr una eficiencia del 20,1 por ciento. En tres años, el rendimiento original se había multiplicado por cinco. En comparación, y tras décadas de desarrollo, las células de silicio se han estancado en niveles cercanos al 25 por ciento, un objetivo que quienes estudiamos las perovskitas tenemos en el punto de mira. De hecho, ya prevemos su presentación comercial, tal vez a través de una empresa derivada como Oxford Photovoltaics, cofundada por uno de nosotros (Snaith).

Las perovskitas resultan atrayentes por varios motivos. Los materiales necesarios para sintetizarlas abundan. Pueden combinarse con facilidad, de forma económica y a bajas temperaturas para crear películas delgadas con una estructura altamente cristalina, similar a la que se obtiene en las obleas de silicio tras un costoso tratamiento a altas temperaturas. Quizás algún día puedan procesarse carretes de láminas de perovskita finas y flexibles (y no gruesas y rígidas, como las de silicio) en impresoras especiales para fabricar revestimientos y paneles solares ligeros, plegables y hasta de distintos colores.

Con todo, antes de destronar al silicio las células de perovskita aún habrán de superar algunos obstáculos importantes. Los prototipos actuales no son mayores que una uña, por lo que todavía no pueden competir con los grandes paneles de silicio. Además, la seguridad y estabilidad a largo plazo de las células tendrá que mejorar considerablemente, una batalla que se prevé ardua.

LA CARRERA DE LA EFICIENCIA

Hoy en día, los mejores dispositivos de silicio ofrecen un rendimiento del 25,6 por ciento. ¿Por qué las células fotovoltaicas no pueden convertir el cien por cien de la energía lumínica del sol en electricidad? ¿Y por qué las perovskitas deberían ser capaces de batir el récord del silicio?

Las respuestas a tales preguntas se hallan en el carácter errático de los electrones. Cuando una célula solar se encuentra a oscuras, los electrones del material permanecen ligados a sus respectivos átomos, por lo que la electricidad no fluye. Sin embargo, cuando la luz incide sobre el dispositivo, algunos electrones pueden liberarse. Dotados de una energía extra, esos electrones se desplazan rápida y caóticamente por la red cristalina de la célula hasta que, o bien la abandonan por un extremo —donde gracias a un electrodo se genera una corriente eléctrica útil—, o bien tropiezan con un obstáculo, en cuyo caso la energía se disipa en forma de calor.

Cuanto mayor sea la calidad del cristal, habrá menos defectos que interrumpan la trayectoria de los electrones. Para eliminar las imperfecciones, las células de silicio deben calentarse a temperaturas de unos 900 grados Celsius. En cambio, las perovskitas carecen en gran medida de tales defectos, a pesar de que se tratan a temperaturas cercanas a los 100 grados. Como resultado, es menos probable que los electrones excitados pierdan energía como consecuencia de las colisiones. Dado que la potencia de la célula viene dada por el producto del flujo de electrones que la abandona (la corriente) y la energía que estos transportan (el voltaje), la eficiencia de las perovskitas puede rivalizar con la del silicio, con la ventaja de un tratamiento más simple.

Sin embargo, existe un límite sobre la cantidad de energía lumínica que una célula fotovoltaica basada en semiconductores, como el silicio y las perovskitas, puede convertir en energía eléctrica. Ello se debe a la «banda prohibida» (*gap*) característica de estos materiales; es decir, al hecho de que, para liberar sus electrones, resulta necesario aplicar una energía mínima. Así pues, de todas las longitudes de onda presentes en la luz solar, solo algunas aportarán la energía necesaria para excitar los electrones del material; el resto simplemente lo atravesará sin generar corriente.

La anchura de la banda prohibida difiere de semiconductor a semiconductor. Su magnitud plantea un conflicto fundamental: si es pequeña, la célula absorberá una fracción mayor del espectro solar, pero la energía media de los electrones excitados disminuirá. Dado que la potencia de la célula depende tanto del número de electrones liberados como de su energía, existe un límite para la proporción de energía solar que una célula

EN SÍNTESIS

El silicio ha dominado el mercado de los paneles solares durante décadas. En los últimos años, las células fabricadas con un material cristalino en alza, la perovskita, se han acercado rápidamente a los niveles de eficiencia del silicio.

Las perovskitas pueden sintetizarse a bajas temperaturas, lo que augura un coste menor. Sus películas son flexibles y coloreadas, por lo que se prestan a un abanico más amplio de aplicaciones que las de silicio, rígidas y opacas.

Sin embargo, aún persisten grandes desafíos. Las células de perovskita deben protegerse de la humedad, se degradan con facilidad y contienen plomo, un material tóxico. Y las células más eficientes son, por el momento, demasiado pequeñas.

fotovoltaica puede convertir en electricidad. Dicho umbral se estima en el 33 por ciento.

El silicio posee una banda prohibida fija que no es ideal, pero domina la industria fotovoltaica ya que sus técnicas de fabricación se conocen muy bien. En cambio, la síntesis de perovskitas permite ajustar a voluntad la anchura de la banda prohibida sin mas que modificar la proporción de ingredientes, lo que brinda la posibilidad de superar la eficiencia del silicio. Otra opción consiste en superponer varias capas de perovskitas diferentes, cada una caracterizada por su propia banda prohibida. En principio, una célula de perovskita de doble capa debería ser capaz de romper la barrera nominal del 33 por ciento; de hecho, algunas estimaciones indican que la fracción de energía solar aprovechable podría ascender incluso al 46 por ciento.

TRUCOS NUEVOS PARA UN MATERIAL VIEJO

Los mineralogistas conocen las formas naturales de las perovskitas desde el siglo XIX. Sus cristales ilustraron una portada de esta revista en 1988 [*véase* «Perovskitas», por Robert Hazen; Investigación y Ciencia, agosto de 1988], cuando se consideraban candidatas prometedoras para fabricar superconductores de alta temperatura (una línea de investigación aún activa hoy en día). Durante las últimas dos décadas se han construido dispositivos electrónicos experimentales con perovskitas sintéticas; sin embargo, su uso en dispositivos fotovoltaicos había pasado inadvertido hasta hace poco.

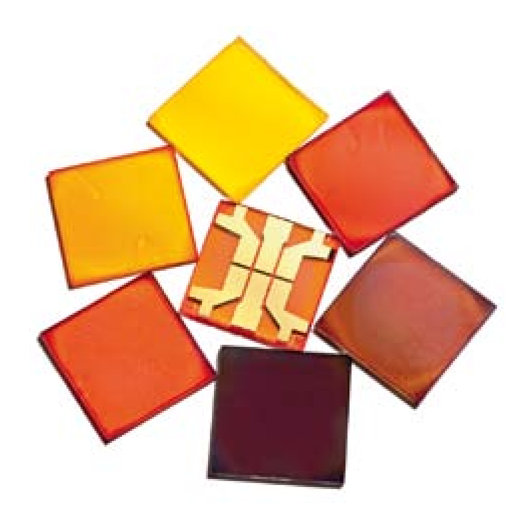
En 2009, un grupo de la Universidad Toin empleó una perovskita artificial (una de haluro de plomo sintetizada en 1978) para fabricar una célula solar. Para ello, los investigadores disolvieron varios compuestos químicos, centrifugaron la solución y la secaron sobre una placa de vidrio. El proceso dejó una película de cristales de perovskita de nanómetros de espesor sobre la superficie. Dicha película generaba electrones libres cuando absorbía la luz solar, aunque no de manera satisfactoria. Al añadir capas finas de material a cada lado de los nanocristales, los electrones podían ser transferidos a un circuito eléctrico externo y producir energía útil.

Aquellas diminutas células solo mostraban un rendimiento del 3,9 por ciento, eran muy inestables y se deterioraban al cabo de unas horas. Lee alteró la composición de la perovskita y sustituyó una capa que resultaba problemática; con ello consiguió una eficiencia de más del 10 por ciento. Otro grupo, liderado por Michael Grätzel, del Instituto Federal Suizo de Tecnología en Lausana, y Nam-Gyu Park, de la Universidad Sungkyunkwan de Corea, logró progresos similares.

Los recientes rendimientos del 20 por ciento han sido posibles gracias a varias innovaciones ingeniosas. Fabricar una película cristalina libre de imperfecciones requiere métodos de deposición delicados. Un grupo encabezado por Sang Il Seok, del Instituto de Investigación en Tecnología Química de Corea, concibió un proceso en varias etapas para forzar la formación de una película de cristal más ordenado. Con sucesivas mejoras de la técnica, en 2014 Seok encadenó tres récords de eficiencia consecutivos, pasando del 16,2 al 20,1 por ciento.

Otros expertos han simplificado la disposición en capas del material añadido; las nuevas células de perovskita se parecen más a una célula de silicio: un apilamiento simple de capas planas. En el caso del silicio, este diseño ha hecho posible su producción en masa a bajo coste. Hace poco, los investigadores optaron por calentar la solución y la placa de vidrio sobre la que se deposita, lo que resultó en cristales varios órdenes de magnitud mayores que los de las células iniciales; una señal alentadora de que la cristalinidad sigue aumentando.

También se están ideando otras características novedosas. Variar las proporciones químicas permite conferir a las células una débil tonalidad amarillenta o un matiz carmesí. Si, en vez de una capa fina, se depositan «islas» de perovskita sobre una placa de vidrio, se pueden crear películas con distintos grados de opacidad. Tales opciones —que contrastan con las rígidas, opacas y negroazuladas células de silicio— dan pie a construir tragaluces, ventanas y fachadas con coloridos paneles solares de perovskita. Imagine un rascacielos con ventanas tintadas que mantengan el interior aislado del calor al tiempo que convierten la luz solar en electricidad, reduciendo la factura de aire acondicionado y suministrando energía.



LOS VARIADOS COLORES de las películas de perovskita permiten usarlas para tintar ventanas y paredes al mismo tiempo que generan electricidad.

UN LARGO CAMINO POR DELANTE

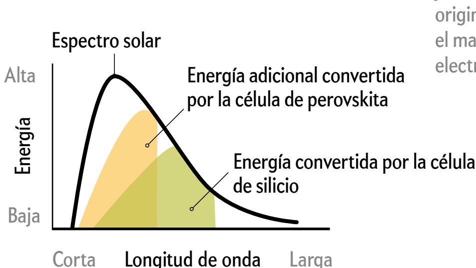
A pesar de todo, las células solares de perovskita aún tienen un largo camino por recorrer hasta su posible comercialización. Aunque hace poco investigadores coreanos y australianos han llevado a cabo demostraciones con células imprimibles de 10 por 10 centímetros (unas dimensiones que permitirían comercializar productos competitivos), las más eficientes siguen siendo prototipos pequeños. Además de aumentar el tamaño de los dispositivos, los laboratorios y las empresas deberán cumplir tres requisitos antes de llegar al mercado: asegurar que las células son lo bastante estables para producir electricidad durante décadas, diseñar un producto que los consumidores perciban como seguro y convencer a quienes advierten de que los niveles de eficiencia de las perovskitas podrían estar inflados.

La estabilidad de las células de perovskita constituye, sin lugar a dudas, su talón de Aquiles. Las perovskitas se degradan con rapidez porque son sensibles a la humedad, lo que obliga a recubrirlas con un sello impermeable. Nuestras células, fabricadas en una atmósfera inerte y encapsuladas en una resina epoxi, han operado de manera estable durante más de 1000 horas de exposición continua a la luz. En colaboración con Grätzel, los investigadores de la Universidad Huazhong de Ciencia y Tecnología, en China, han alcanzado también las 1000 horas de actividad, incluso sin encapsulación. En un trabajo publicado hace poco, desplegaron paneles solares de prueba en Arabia Saudí para demostrar que su diseño funcionaría en condiciones reales. En un congreso reciente de la Sociedad de Investigación de Materiales en San Francisco, hicimos públicos resultados

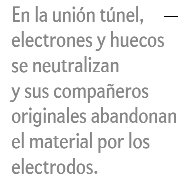
ASÍ FUNCIONA

Dos mejor que uno

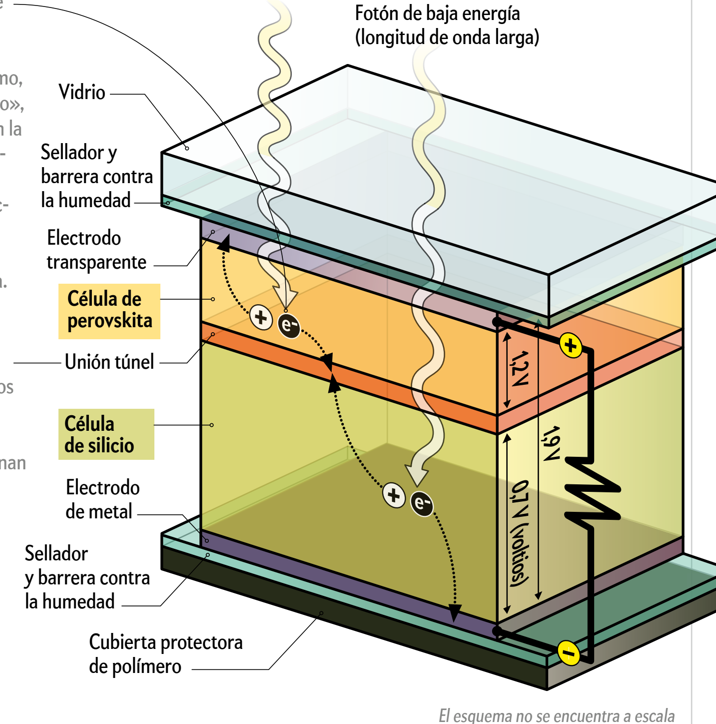
Las células fotovoltaicas de silicio y perovskita podrían operar de manera conjunta, lo que aumentaría la eficiencia que cada una de ellas presenta por separado. En una célula tándem (*derecha*), una capa de perovskita y una de silicio conectadas generan electrones libres con mayor energía que cualquiera de los dos materiales por sí solos. Además, la perovskita y el silicio absorben diferentes longitudes de onda (*abajo*), lo que permite aprovechar una fracción mayor del espectro solar.



Un fotón incidente transfiere energía a un electrón y lo arranca de su átomo, dejando un «hueco», o espacio vacío, en la estructura. El electrón y el hueco se mueven hacia electrodos opuestos, lo que genera una corriente eléctrica.



En la unión túnel, electrones y huecos se neutralizan y sus compañeros originales abandonan el material por los electrodos.



El esquema no se encuentra a escala

JEN CHRISTIANSEN

de Oxford Photovoltaics que demostraban que las células de perovskita podrían generar corriente eléctrica estable durante más de 2000 horas a pleno sol.

Sin embargo, la convención industrial establece que los paneles solares han de contar con una garantía de 25 años, lo que equivale a unas 54.000 horas de luz solar constante. Por ello, un aspecto clave será encontrar una barrera contra la humedad que funcione durante tanto tiempo y en un amplio abanico de temperaturas. La industria del silicio ha solucionado el problema laminando las células entre paneles de vidrio, una técnica ideal para grandes instalaciones situadas al nivel del suelo. Pero, dado que las células de perovskita pueden dar lugar a películas mucho más ligeras y flexibles que las depositadas sobre vidrio, una estrategia de encapsulación alternativa posibilitaría una amplia variedad de aplicaciones, como revestimientos para paredes o ventanas generadoras de electricidad.

Por fortuna, las compañías que intentan comercializar otros materiales solares flexibles, como el semiconductor de seleniuro de cobre-indio-galio, han logrado ya algunos avances al respecto. Las técnicas de encapsulación funcionan bien, pero arrebatarle cuota de mercado al silicio ha resultado difícil porque las células son menos eficientes y cuestan más. Las perovskitas, que deberían gozar de mayores rendimientos y menores costes de tratamiento, quizá logren explotar tales progresos.

Sin embargo, tan importante como evitar que la humedad penetre en el interior de la célula es impedir que su contenido escape al exterior. Las células de perovskita contienen pequeñas cantidades de plomo, un material tóxico, por lo que la industria exigirá pruebas contundentes sobre su seguridad. A este respecto, los investigadores pueden inspirarse en otro material solar, el único aparte del silicio que ha logrado un éxito comercial: el telururo de cadmio.

Fabricados por la compañía First Solar, los paneles de telururo de cadmio se extienden por todo el mundo y han superado las pruebas de seguridad a pesar de contener un elemento mucho más tóxico que el plomo: el cadmio. First Solar ha demostrado que sus paneles se encuentran tan bien sellados que el cadmio no podría escapar ni en un incendio incontrolado en el desierto a 1000 grados Celsius. Sin embargo, los paneles usan un sustrato de vidrio, lo que deja a un lado la flexibilidad y la ligereza que prometen las perovskitas. Aun así, queda margen todavía para aprender del éxito de First Solar en lo referente al sellado de sus productos y las rigurosas pruebas a las que son sometidos.

Otro avance alentador tuvo lugar hace poco en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT): Angela Belcher y sus colaboradores demostraron que las baterías de plomo y ácido de los automóviles podían reciclarse sin peligro y que el plomo podría emplearse para fabricar células de perovskita, lo que supondría una ventaja ambiental. Belcher calcula que el plomo de una sola batería de coche permitiría producir unos 700 metros cuadrados de placas de perovskita. Con un rendimiento del 20 por ciento, ello bastaría para abastecer de electricidad a 30 casas en un clima templado y soleado.

Una alternativa consistiría en eliminar el plomo. Nuestro grupo, así como otro de la Universidad Noroccidental de EE.UU., ha publicado informes preliminares de células que emplean estaño en lugar de este material tóxico. Sin embargo, su eficiencia y estabilidad se ven mermadas, ya que el estaño suele provocar que la perovskita acabe perdiendo su estructura cristalina. Será necesario un avance de calado para lograr que el estaño iguale la eficiencia del plomo a largo plazo.

Aparte de las cuestiones mencionadas aquí, los investigadores aún habrán de hacer frente a un problema algo más excén-

trico. Los críticos han argumentado que los valores de eficiencia de las células de perovskita podrían haberse exagerado como consecuencia de la histéresis; una fluctuación en las mediciones causada, probablemente, por la migración de iones de un lado a otro de la célula, lo que provoca la apariencia de una corriente más intensa. Dicha migración tiene lugar durante un corto período de tiempo. Los expertos están buscando formas de detenerla, pero, a corto plazo, existe un remedio sencillo: esperar a que cese la migración y medir la eficiencia sobre períodos de tiempo más largos. En la mayoría de los casos, este procedimiento proporciona lecturas de rendimiento similares a las medidas iniciales, pero los investigadores pueden verse tentados a seleccionar los valores más altos. En estos momentos estamos trabajando con investigadores de todo el mundo a fin de estandarizar los métodos de medición y adaptarlos al escrutinio más exigente.

Por último, los innovadores que apuesten por la perovskita tendrán que elaborar un discurso económico convincente que atraiga a los inversores para su producción a gran escala. Aunque los componentes de las perovskitas abundan y las células pueden procesarse a bajas temperaturas y con un equipo asequible, las compañías no deberían caer en la trampa de competir con el silicio en sus mismos términos. Hay poco margen para ofrecer un producto más barato, ya que la mayor parte del coste de una instalación solar no se debe a los paneles, sino a los gastos de «balance del sistema»; es decir, materiales de instalación, mano de obra, permisos, inspecciones, etcétera. En 2014, el precio de una instalación solar residencial media en Estados Unidos se situaba en 3,48 dólares por vatio de capacidad de generación, si bien el coste del panel apenas rondaba los 72 céntimos por vatio. Aunque las placas de perovskita lograsen venderse al irrisorio precio de 10 o 20 céntimos por vatio que pronostican los investigadores, el coste final solo se vería reducido en un pequeño porcentaje.

No obstante, las empresas sí podrían aprovechar ese pequeño ahorro si desarrollasen productos más eficientes que los de silicio. Un panel solar de perovskita disminuye el coste total por vatio al requerir menos terreno o menos espacio en el tejado y, por tanto, menos equipo y mano de obra. Otra posibilidad de cambiar las reglas del juego consistiría en fabricar productos con los que el silicio no pueda competir, como láminas que se integren directamente en los materiales de construcción de paredes, tejados y ventanas.

LA SOLUCIÓN HÍBRIDA

Por ahora, la mejor oportunidad de las perovskitas quizá sea aliarse con el silicio en lugar de competir con él. Si lograran beneficiarse de su éxito, las perovskitas tendrían acceso a un mercado de 50.000 millones de dólares.

Una alternativa podría consistir en fabricar células «tándem», con una capa de perovskita colocada sobre una de silicio. Las perovskitas aprovechan bien las longitudes de onda más energéticas del espectro, como las correspondientes a la luz azul y ultravioleta (las cuales el silicio no es capaz de capturar), lo que genera un voltaje mucho más elevado. Hace poco, investigadores de Stanford y del MIT superpusieron una célula de perovskita sobre una de silicio sellada, lo que aumentó su rendimiento del 11 al 17 por ciento. También ensamblaron una célula tándem con una capa de perovskita sobre otra de silicio sin sellar, en una sola estructura. La combinación mostró una eficiencia del 14 por ciento, si bien dicho valor debería poder elevarse mejorando el proceso de fabricación. A raíz de ambos experimentos, los investigadores auguraron que una célula mixta, basada en dispositivos de silicio y perovskita de última generación, ofrecería un rendimiento superior al 30 por ciento sin necesidad de implementar cambios de calado en ninguna de las tecnologías.

Una placa solar con una tasa de conversión del 30 por ciento ejercería un impacto enorme sobre los costes de balance del sistema. Con respecto a las células que hoy presentan una eficiencia del 20 por ciento, bastarían dos tercios de los paneles para generar la misma electricidad, al tiempo que se reducirían considerablemente los materiales de instalación, la mano de obra, el equipo y la cantidad de espacio requerido en el tejado o el suelo. Oxford Photovoltaics, la compañía de Snaith, se ha asociado con fabricantes tradicionales de silicio para aumentar la eficiencia de conversión aplicando un recubrimiento de perovskita a las células de silicio. La empresa se ha propuesto crear prototipos de células tándem este año. En el futuro, los revestimientos fotovoltaicos de bajo coste integrados en materiales para tejados o acristalamientos podrían transformar por completo la estructura de costes asociada a un edificio abastecido con energía solar.

DAR LA VUELTA AL PROCESO

El rápido ascenso de las células solares de perovskita ha inspirado a científicos e ingenieros para fabricar otros productos. En colaboración con nuestros colegas de la Universidad de Cambridge, hemos creado hace poco ledes y láseres que usan perovskitas de haluros metálicos, los cuales emiten luz (en lugar de absorberla) con gran eficiencia.

No se trata de un resultado tan sorprendente. Al invertir su método de funcionamiento, la célula solar más eficiente del mundo, compuesta de arseniuro de galio, actúa como un led. El desarrollo de láseres y ledes imprimibles y de bajo coste conduciría a aplicaciones fascinantes, desde el campo de la iluminación a gran escala hasta el de las imágenes médicas.

La investigación sobre estos nuevos productos se encuentra en una fase temprana, pero creemos que adquirirá popularidad. Las perovskitas han hecho que los científicos nos sintamos como niños en una tienda de golosinas. Hemos hallado un material cuyas propiedades cumplen casi todos los requisitos de nuestra lista de deseos: alto rendimiento, bajo coste, ligereza, flexibilidad y atractivo estético. Hará falta un esfuerzo concertado por parte de instituciones académicas, industria y Gobiernos para explotar todo el potencial de las perovskitas y dejar atrás la era del silicio. Teniendo en cuenta el premio (energía limpia, barata y la próxima generación de dispositivos electrónicos), creemos que las perovskitas son una buena apuesta.

PARA SABER MÁS

The emergence of perovskite solar cells. Martin A. Green, Anita Ho-Baillie y Henry J. Snaith en *Nature Photonics*, vol. 8, págs. 506-514, julio de 2014.

Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells. Nam Joong Jeon et al. en *Nature*, vol. 517, págs. 476-480, enero de 2015.

Metal-halide perovskites for photovoltaic and light-emitting devices. Samuel D. Stranks y Henry J. Snaith en *Nature Nanotechnology*, vol. 10, págs. 391-402, mayo de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

El futuro de la energía solar. Bernd Müller en *IyC*, mayo de 2012.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO*
o 5 ejemplares de *TEMAS*
por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. **ASTRONOMÍA**
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA**
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION**
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA**
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA**
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS**
Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA**
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **MEDIOAMBIENTE**
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS**
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. **LUZ Y TÉCNICA**
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. **ENERGÍA**
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 12,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

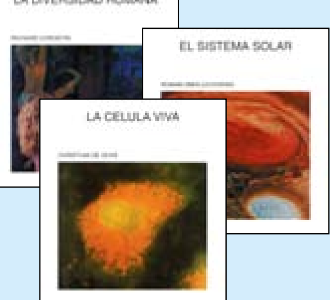
BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe
MyC 72: Musicoterapia
MyC 73: La neurociencia del futuro
MyC 74: El poder de las marcas

(*) Disponible solo en formato digital





TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal
T-79: Comprender el cáncer
T-80: Grandes ideas de la física

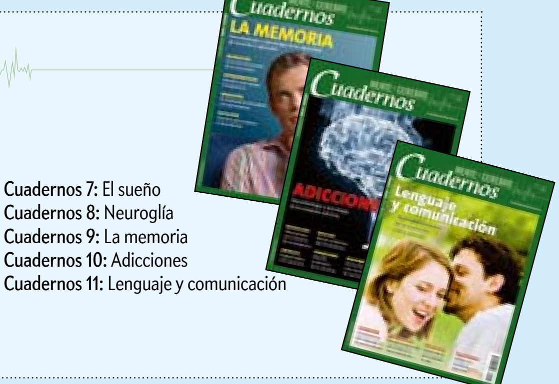
(*) Disponible solo en formato digital





Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones
Cuadernos 11: Lenguaje y comunicación





por Anna Gili, Anna Whitehouse y José Manuel Fortuño

Praderas de algas, el hogar de otras especies

Las macroalgas del litoral conforman un hábitat idóneo para numerosos animales, que encuentran en ellas un lugar para alimentarse y protegerse de los depredadores

Las praderas de algas de la zona litoral constituyen uno de los hábitats marinos más productivos. Las algas crecen constantemente gracias a su ubicación, caracterizada por una elevada radiación lumínica y un aporte constante de nutrientes procedentes tanto de la zona terrestre como de las corrientes marinas superficiales.

Para muchos animales, vivir en este ambiente dominado por algas resulta complicado, ya que no pueden ocupar el fondo marino con la misma eficacia y rapidez que estos vegetales. La única manera de poder subsistir en esta zona tan productiva y disponer del alimento transportado por las corrientes o derivado de la descomposición de las algas consiste en vivir entre las ramificaciones de sus talos. Pero para ello deben adaptarse a sobrevivir en un ambiente muy hidrodinámico en el que los talos de las algas se mueven sin cesar.

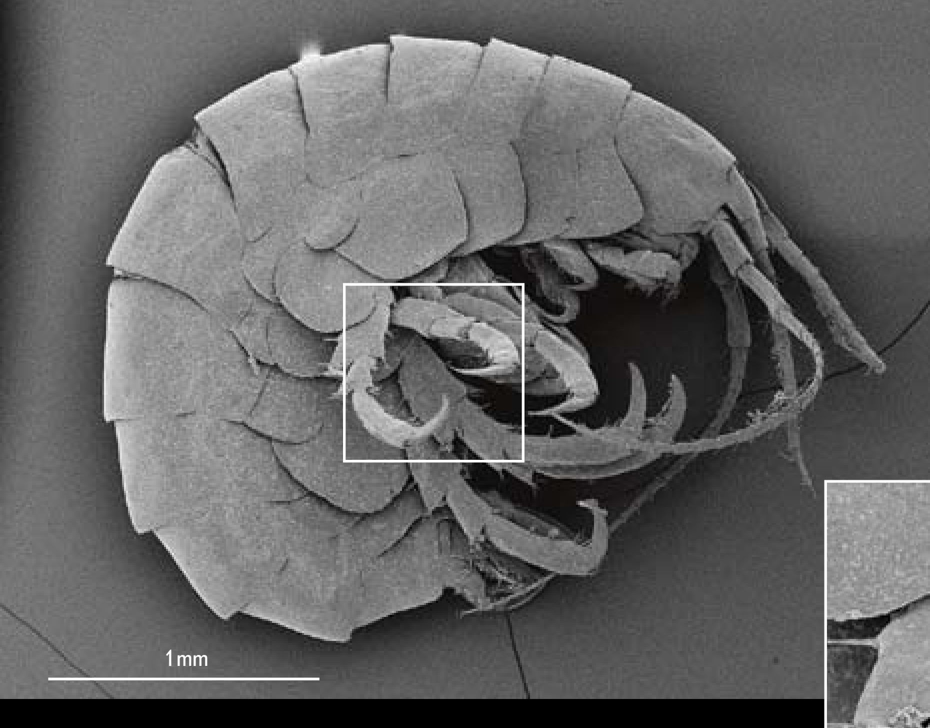
Los animales que mejor se han adaptado a este hábitat litoral son los anfípodos. Estos pequeños animales viven escondidos entre los talos de las algas, de donde salen para alimentarse de noche para evitar a los depredadores, sobre todo peces. Para no ser arrastrados por las corrientes, los anfípodos han desarrollado toda una serie de adaptaciones morfológicas, especialmente en sus patas, que les permiten engancharse al tejido de las algas con gran facilidad. Esta estrategia resulta esencial para poder permanecer en un hábitat que les confiere refugio y alimento en abundancia.

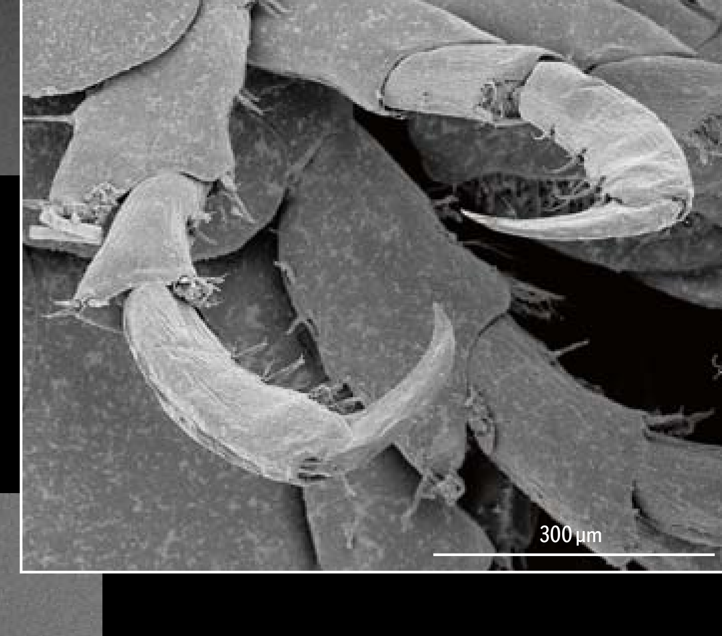
—Anna Gili, Anna Whitehouse y José Manuel Fortuño
Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona (CSIC)



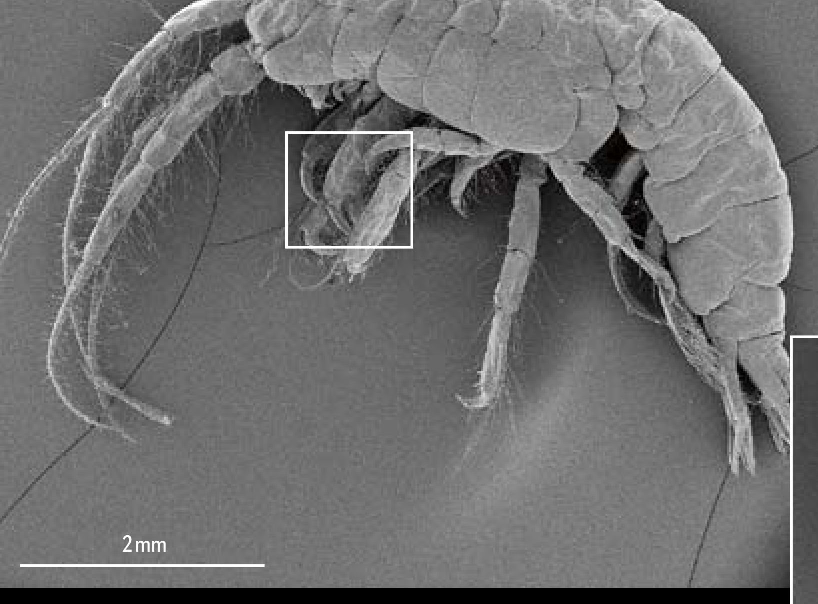
LAS PRADERAS DE MACROALGAS del género *Cystoseira*, en el litoral mediterráneo, esconden entre sus talos una gran diversidad de animales.

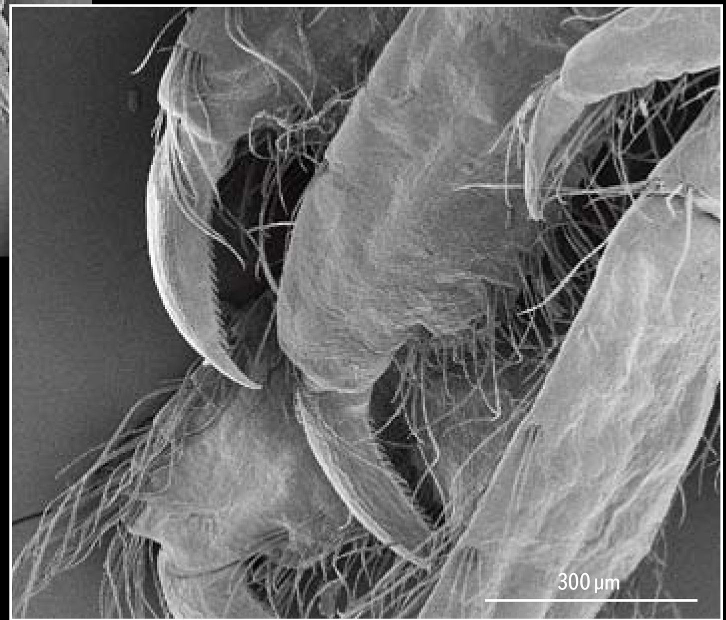
ALEX LORENTE





EL FUERTE CAPARAZÓN DE QUITINA permite a este anfípodo del género *Parhyale* resistir el rozamiento de los frondes del alga. El animal se sujeta sobre ella con la parte final de las patas torácicas, armadas con prolongaciones en forma de fuertes ganchos (*inserto*).





LAS PATAS TORÁCICAS Y ABDOMINALES de *Psammogammarus* ayudan a este anfípodo a engancharse a una amplia variedad de talos de algas. Puede resistir las zonas de fuertes corrientes gracias a las terminaciones de sus patas, en forma de ganchos con estructuras serradas y pelos adherentes (*inserto*).

por Albert Solé y Carl Hoefer



Albert Solé es profesor de filosofía de la física en la Universidad de Barcelona.

Carl Hoefer es profesor ICREA de filosofía de la física en la Universidad de Barcelona.

Aleatoriedad y mecánica cuántica

Crónica de un diálogo entre físicos, matemáticos, informáticos y filósofos

¿Qué es un número aleatorio? Dada una determinada secuencia de ceros y unos,

...0101110001101101010001011101O...

¿hay algún modo de establecer si dicha secuencia es genuinamente aleatoria o si tan solo lo parece? Los matemáticos se han preocupado por esta cuestión proponiendo algunos criterios. Si, conociendo un número de la secuencia y mediante la aplicación de una sencilla regla, podemos conocer el número siguiente, diríamos que la secuencia no es aleatoria. Por tanto, podríamos considerar que una secuencia es aleatoria si no puede generarse mediante reglas que sean más sencillas (que contengan menos información) que la contenida en la propia secuencia. Sin embargo, no puede descartarse que una secuencia simple y aparentemente no aleatoria pueda ser resultado de un proceso aleatorio, del mismo modo que al lanzar varias veces una moneda puede salir siempre cara a pesar de que la moneda no esté trucada. Esto nos lleva a pensar que, quizá, para saber si una secuencia es aleatoria no hay que fijarse en la secuencia en sí, sino en el proceso seguido para obtenerla. Y esto nos lleva de las matemáticas a la física.

Si pensamos en física y en aleatoriedad, a buen seguro nos vendrá a la mente la mecánica cuántica. Suele decirse que, al contrario que la clásica, esta es una teoría indeterminista. En mecánica cuántica los sistemas físicos se representan mediante una función de onda. De acuerdo con la interpretación ortodoxa, dos sistemas caracterizados por la misma función de onda son idénticos. Sin embargo, la teoría nos dice que podemos tener dos átomos de uranio con la misma función de onda y que uno de ellos se desintegre al pasar una hora y el otro no. Todo lo que se desprende de la mecánica cuántica es que hay cierta probabilidad de que el átomo se desintegre al cabo de una hora. Si los dos átomos son idénticos, su desintegración es un evento aleatorio. ¿Por qué no utilizamos entonces eventos físicos de este tipo para generar números genuinamente aleatorios? Las cosas no son tan sencillas. Es el momento de pasar de la física a la filosofía (de la física).

El problema radica en que hay muchas interpretaciones de la mecánica cuántica —o muchas teorías cuánticas, si se quiere— que, si bien están de acuerdo en sus predicciones probabilísticas, difieren notablemente en cómo hay que interpretar dichas probabilidades. Volviendo al ejemplo de los átomos de uranio, de acuerdo con la versión de la mecánica cuántica descubierta por David Bohm en 1952, aunque dos átomos estén caracterizados por la misma función de onda, ello no implica que estos sean idénticos [*véase* «Teoría alternativa de Bohm a la mecánica cuántica», por David Z. Albert; Investigación y Ciencia, julio de 1994]. Existe una propiedad no reflejada en la función de onda que determina si un átomo va a desintegrarse o no; si esta propiedad se tiene en cuenta, la evolución de los sistemas aparece como completamente determinista. Sin embargo, la propia teoría establece límites en nuestra posibilidad de conocer dicha propiedad; de este modo, consigue replicar las predicciones probabilísticas de la propuesta estándar.

Es precisamente una tarea de la filosofía de la física averiguar la naturaleza de la probabilidad en las distintas teorías cuánticas y elucidar las relaciones entre determinismo y aleatoriedad. También se discute si ciertos fenómenos clásicos, a pesar de ser deterministas, pueden considerarse aleatorios en virtud de su complejidad o de estar sujetos a dinámicas caóticas. Por otro lado, como veremos, entra también en el debate la teoría de la relatividad. Como es bien sabido, esta prohíbe que ninguna señal se transmita a una velocidad mayor que la de la luz. Por tanto, si dos eventos lejanos ocurren de forma casi simultánea, podemos considerar que son independientes, puesto que la influencia de uno no habrá tenido tiempo de alcanzar al otro. Esta situación se halla en la base de muchos procesos de obtención de números aleatorios, que se denominan «pruebas de Bell».

¿Por qué es tan importante poder obtener números aleatorios? En la era de las comunicaciones por Internet, este asunto tiene una importancia capital, puesto que, mediante secuencias aleatorias, podemos cifrar la información y evitar que esta llegue a las manos de un tercero. Así, existe hoy en día una gran industria de físicos aplicados cuyo interés radica en construir dispositivos, basados en procesos cuánti-



GENERADOR CUÁNTICO de números aleatorios presentado en el congreso por Morgan Mitchell y Carlos Abellán, del ICFO. Se usa para pruebas de Bell.

IMAGEN © ICFO - INSTITUTO DE CIENCIAS FOTÓNICAS

cos y clásicos, que puedan generar secuencias cuya aleatoriedad esté certificada.

Podemos comprender ahora cómo la cuestión de la aleatoriedad incumbe a matemáticos, informáticos, filósofos y físicos. El congreso «Aleatoriedad en física cuántica y más allá», organizado por el Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO) con apoyo financiero de la Fundación John Templeton y celebrado en Barcelona el pasado mayo, constituyó una inusual invitación al diálogo entre estas comunidades y cosechó un gran éxito. Los contenidos discutidos durante la semana que duró dicho evento son, de lejos, demasiado ricos y complejos para ser adecuadamente presentados en esta breve reseña. Podemos, sin embargo, ofrecer al lector una muestra de los temas principales que surgieron en varias presentaciones.

Física

Muchas de las ponencias por parte de los físicos abordaron, de un modo u otro, las mencionadas pruebas de Bell. Un experimento paradigmático de esta clase consiste en dos partículas que, encontrándose en un estado cuántico «entrelazado», son enviadas cada una de ellas a un ala distinta del laboratorio. En cada ala se encuentra un físico, presto a medir una propiedad o parámetro (de su elección) de la partícula en cuestión, siendo ambas mediciones prácticamente simultáneas. La idea aquí es que ni la elección del parámetro que se mide en un ala ni el resultado obtenido en dicha ala pueden afectar a los resultados de la otra ala, si se asume que ninguna influencia puede viajar a una velocidad mayor que la de la luz. La cuestión relevante es si puede demostrarse que los resultados obtenidos en cada ala son genuinamente aleatorios, excluyéndose que estos vengan determinados por propiedades poseídas, antes del acto de la medición, por el sistema cuántico, el aparato de medida, o ambos.

En una serie de trabajos realizados durante la década de los sesenta del siglo pasado y otros posteriores, el físico John Bell mostró que si se asume (*i*) que no se da ninguna forma de influencia a distancia instantánea, (*ii*) que los físicos en las distintas alas del experimento pueden elegir libremente qué propiedad desean medir, justo antes del evento de la medición, y (*iii*) que los resultados de las mediciones vienen determinados por propiedades intrínsecas de las partículas y de los aparatos en cada ala (y que dichas propiedades no están coordinadas de modo conspiratorio con las elecciones libres de los físicos de cada ala), entonces existen unos límites determinados en el nivel posible de correlación entre los resultados de las mediciones. Límites que los sistemas de partículas cuánticas entrelazadas violan ampliamente en muchísimos experimentos realizados desde 1977. Por tanto, los físicos —que aceptan (*i*) y (*ii*)— concluyen que los resultados no vienen determinados de antemano, es decir, que son genuinamente aleatorios.

Algunos de los principales artículos de referencia sobre pruebas de Bell y la generación de números aleatorios certificados son obra de autores como Roger Colbeck, de la Universidad de York, Antonio Acín, del ICFO, Renato Renner, del Instituto de Física Teórica en Zúrich, o Stefano Pironio, de la Universidad Libre de Bruselas, los cuales presentaron en el congreso sus trabajos más recientes.

Las principales novedades tienen que ver con análisis elaborados acerca de las condiciones de la «libre elección» del parámetro que se pretende medir en cada ala del experimento. Mientras que en los estudios clásicos se asumía la libertad completa de esas elecciones (su aleatoriedad con respecto a todos los otros aspectos del experimento y de su entorno), en las investigaciones recientes se ha demostrado que una cantidad pequeña de aleatoriedad en la elección del parámetro (una predictibilidad incompleta de dicha elección por parte de un observador ajeno) puede ser amplificada cuánticamente hasta obtener una aleatoriedad casi perfecta.

Matemática y computación

Algunos matemáticos e informáticos abordaron los requerimientos que deben cumplir los generadores cuánticos de números aleatorios (QRNG, por sus siglas en inglés) para ser del todo inmunes al ataque de un «adversario» criptográfico. Dichos requerimientos son sorprendentemente exigentes, aunque alcanzables con técnicas ya existentes. En la cuestión de la certificación de la aleatoriedad, mucho depende de qué tipo de escenario paranoico se quiera excluir. Para los más cercanos al mundo de la criptografía, lo que se quiere descartar es cualquier escenario en el cual el «adversario» tenga una manera de predecir el resultado que saldrá del QRNG. Por este motivo, es crítico el proceso mediante el que se decide el parámetro que se medirá en cada ala del experimento, pues, si un adversario puede adivinar dichos parámetros, teóricamente tiene una herramienta que le permite romper la aleatoriedad de los resultados de una prueba de Bell.

Filosofía

Los filósofos que participaron en el congreso —y algún que otro físico— tendían a cuestionar las premisas que se asumen para certificar la aleatoriedad de los resultados de una prueba de Bell. Un motivo principal subyace a su escepticismo: la mencionada teoría de Bohm. En esta versión de la mecánica cuántica, completamente determinista, no hay aleatoriedad intrínseca. ¿Cómo sortea entonces las pruebas de aleatoriedad de Colbeck, Renner y otros? Estas pruebas asumen que no hay una conexión causal entre la elección de qué parámetro se mide en un ala y el resultado obtenido en la otra ala. Sin embargo, este tipo de conexión no local es postulada precisamente por la teoría de Bohm, sin que ello implique ni coincidencias globales inverosímiles ni una falta de libertad en la elección de los parámetros, excepto en el sentido trivial en que el determinismo se halla siempre en tensión con la libertad.

Es cierto que la mayoría de los físicos están dispuestos a descartar la teoría de Bohm por asuntos que aquí no vienen al caso. Pero, dado que esta resuelve el notorio problema de la medida en mecánica cuántica, muchos filósofos creen que no se debe descartar que una teoría parecida a la de Bohm pudiera eventualmente reemplazar a la interpretación estándar, eliminando de nuevo la aleatoriedad de nuestra imagen de la naturaleza. El misterio de si vivimos en un mundo genuinamente aleatorio sigue vivo.

PARA SABER MÁS

Philosophical consequences of quantum theory: Reflections on Bell's theorem. Dirigido por James T. Cushing y Ernan McMullin. University of Notre Dame Press, 1989.

Lo decible y lo indecible en mecánica cuántica. J. S. Bell. Alianza Editorial, 1991.

Random numbers certified by Bell's theorem. S. Pironio, A. Acín, S. Massar y otros en *Nature*, vol. 464, págs. 1021-1024, 2010.

Página web del congreso *Randomness in quantum physics and beyond*, celebrado en Barcelona en mayo de 2015 **http://qrandom.icfo.eu**

EN NUESTRO ARCHIVO

Misterios de la física cuántica. VV. AA. Colección *Temas de IyC* n.º 10, 1997.

La certeza del azar cuántico. Antonio Acín, Serge Massar y Stefano Pironio en *IyC*, enero de 2012.

por Ismael Ràfols



Ismael Ràfols es analista de políticas científicas en INGENIO, instituto mixto del CSIC y la Universidad Politécnica de Valencia, investigador visitante de la Unidad de Investigación de Política Científica de la Universidad de Sussex y del Observatorio de Ciencias y Técnicas de París.

El Manifiesto de Leiden

Hacia un mejor uso de los indicadores en la evaluación de la ciencia

La evaluación es esencial en la gestión de la ciencia. Se necesita para contratar investigadores, distribuir recursos económicos y monitorizar la ciencia producida y sus efectos sobre la sociedad. Se trata, sin embargo, de un ejercicio controvertido: debido a la especialización de la ciencia, un trabajo solo puede ser juzgado por investigadores (los pares o expertos) de esa especialidad; son los únicos con conocimiento suficiente para realizar una evaluación competente.

El gran problema de la evaluación por pares es la posibilidad de que estos incurran en prácticas de favoritismo, apoyando a investigadores con quienes tienen relaciones personales o institucionales. Como el nepotismo goza de una larga tradición en numerosos países, la revisión por pares despierta a menudo sospechas de corrupción.

Ante esta situación, muchos gestores, particularmente en países como España, creyeron ver en los indicadores cuantitativos de la ciencia un parámetro objetivo y riguroso de evaluación. En efecto, indicadores bibliométricos como el número de artículos o su impacto informan sobre la producción y la influencia científica, y permiten comparaciones internacionales. Pero su correcto uso es más difícil de lo que parece. Puesto que las normas de publicación y citación varían con el contexto, los valores de referencia de los indicadores pueden variar en órdenes de magnitud (10 o 30 veces) según el campo científico o tema, la lengua o el rango institucional del evaluado. Es necesario, pues, escoger indicadores apropiados para cada evaluación y calibrarlos si queremos evitar juicios sesgados que puedan minusvalorar ciertos tipos de investigación (la ciencia experimental ante la teórica, la local ante la general, etcétera). Decisiones basadas en indicadores sesgados no reflejarán adecuadamente los criterios de evaluación.

En la práctica, raramente se utilizan solo indicadores bibliométricos. Sin embargo, la gran difusión de herramientas como Web of Science, Scopus o Google Académico ha hecho que procesos de evaluación, supuestamente de revisión de expertos, acaben siendo muy influidos por un uso informal y a menudo incorrecto de indicadores. Por ejemplo, en una evaluación por pares de una beca, un revisor justifica su buena puntuación del candidato porque es autor de artículos publicados en revistas con «alto factor de impacto (entre 2 y 3)», sin explicar cuál es el campo científico que toma de referencia (en medicina este sería un factor de impacto bajo). Lo que este caso demuestra es que la disyuntiva entre indicadores y revisión por pares es falsa: el problema más común es una mala revisión por expertos que utilizan mala bibliometría. Y al hallarse estas malas prácticas muy extendidas, existe el riesgo de que se produzcan valoraciones injustas y se tomen decisiones incorrectas.

Como respuesta a tan preocupante situación, en fecha reciente se han lanzado dos iniciativas. La primera es el Manifiesto de Leiden —del que soy coautor—, un decálogo de buenas prácticas para el uso de indicadores en evaluación, publicado el pasado abril en *Nature* (puede descargarse una versión del mismo en español en www.leidenmanifesto.org). La segunda es un informe del Consejo de Financiación de la Educación Superior de Inglaterra (HEFCE), publicado en julio (www.responsiblemetrics.org).

Ambas propuestas comparten el mismo principio: la cientometría puede enriquecer la evaluación, pero requiere un uso apropiado y un proceso cuidadoso. La mejor evaluación, la más rigurosa y plural, es aquella en la que la bibliometría apoya la evaluación de expertos.

En primer lugar, los indicadores cuantitativos solo cobran sentido cuando se interpretan en un contexto específico: disciplinario, sectorial y geográfico. Los expertos deben decidir qué indicadores son válidos dada la misión de la investigación evaluada (astrofísica, agricultura o salud requieren indicadores distintos), o si el carácter local de un tema (cuanto más local, menos probabilidad de atraer citas) hace difícil la comparación con temas de interés general.

Una segunda consideración es que los evaluados tienen derecho a la transparencia, a saber qué datos se usan y cómo se calculan los indicadores que les evalúan.

Tercero, es muy importante reconocer los límites de precisión de los indicadores. A nivel individual, donde los indicadores tienen poca validez y mucha volatilidad, es necesario juzgar cualitativamente.

Finalmente, el Manifiesto y el informe HEFCE recomiendan prestar atención a los efectos, a veces inesperados y perversos, que los indicadores tienen sobre el comportamiento de los investigadores [*véase* «Riesgos de la nueva bibliometría», por Emilio Delgado López-Cózar; Investigación y Ciencia, abril de 2014].

El nepotismo al que puede abocarse la revisión por expertos no debería sustituirse por un uso rígido o arbitrario de los indicadores bibliométricos. Contraponer malas prácticas de revisión con mala bibliometría es una pésima solución. La cientometría puede desempeñar un papel importante en la evaluación, pero como apoyo a la revisión de expertos. Para tal fin, su uso debe ser humilde, transparente y riguroso, atento a la diversidad de la investigación y reflexivo ante los efectos que pueda generar.

THINKSTOCKPHOTO/KONE (*calibrador*); THINKSTOCKPHOTO/ELNUR AMIKISHIYEV (*papel*)

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es coordinador del proyecto UB-Bullipedia.

La quinina

De los antipalúdicos al *gin-tonic*

La percepción del sabor de los alimentos ha sido motivo de numerosos estudios, sobre todo, desde que en 1825 Jean-Anthelme Brillat-Savarin publicó *La fisiología del gusto*. Entre otros aspectos, se han investigado las connotaciones perceptivas de las diferentes moléculas que componen los alimentos y su relación con la genética [*véase* «Cuestión de gustos», por Angelika Bauer-Delto; Mente y cerebro n.º 61, 2013].

Los trabajos que versan sobre el sabor amargo ocupan un lugar destacado, ya que la percepción del mismo es la que presenta mayor variabilidad genética. El sabor extraordinariamente amargo de las sustancias de la familia de la tiourea, por ejemplo, es percibido solo por una parte de la población. En 2000, Hiroaki Matsunami, Jean-Pierre Montmayeur y Linda B. Buck, del Instituto de Medicina Howard Hughes y la Escuela de Medicina de Harvard, identificaron los receptores vinculados al sabor amargo, lo que permitió clasificarlo como sabor básico.

La quinina suele considerarse la molécula patrón del sabor amargo. Se trata de un compuesto alcaloide que se extrae de la corteza del quino. Sus propiedades se han mitificado debido a su uso médico para combatir la malaria. Gastronómicamente, es el componente que da sentido al agua tónica, que debe su nombre a las propiedades tonificantes de la quinina.

El invento del agua tónica debe atribuirse a Johann Jacob Schweppe. En el año 1783 consiguió introducir burbujas de dióxido de carbono en agua embotellada y, casi un siglo más tarde, en 1870, añadió quinina a su producto carbonatado.

En 1817, Pierre Joseph Pelletier y Joseph Bienaimé Caventou lograron aislar y extraer la quinina de la corteza del quino, lo que propició la distribución de esta por todas las colonias donde la malaria hacía estragos. El sabor fuertemente amargo del alcaloide hizo que oficiales británicos de la India le añadieran zumo de limón, azúcar y ginebra para que su consumo resultara más placentero. El invento tuvo tal éxito que compañías como la propia Schweppes pusieron en el mercado sus productos carbonatados con quinina ya con el nombre de «tónica» y que empresas como Beefeater propusieran sus ginebras para elaborar *gin-tonics*.

En esos tiempos, las aguas tónicas contenían una dosis de quinina muy elevada, puesto que su función era terapéutica. Pero su sabor y frescor característico pronto fueron muy apreciados entre los consumidores de las colonias y pasó al continente, donde no era necesaria una carga de quinina tan elevada. Actualmente, el uso antipalúdico del agua tónica ha desaparecido, aunque en algunos países con malaria vuelve a plantearse, debido a que algunos de los medicamentos sustitutivos empiezan a tener problemas con cepas resistentes.

Se ha demostrado que las dosis elevadas de quinina pueden resultar perjudiciales. Se han relacionado con trastornos gastrointestinales, visuales, auditivos, cardiovasculares y neurológicos, así como cefaleas, confusión, coma, ceguera e incluso psicosis. En 2004, la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. fijó en 83 partes por millón (ppm) la dosis máxima admitida en las aguas tónicas. En Europa, la ley solo exige que el etiquetado indique la presencia de este componente, pero no su porcentaje.

Actualmente, la proporción de quinina en las aguas tónicas es muy baja, unas 250 veces inferior a la terapéutica de antaño y lejos de las dosis nocivas. En el estudio «Aspectos toxicológicos del consumo de bebidas refrescantes que contienen quinina», publicado en 2008 en *Nutrición Clínica y Dietética Hospitalaria* por Xesús Feás y sus colaboradores, de la Universidad de Lugo, se analizaron 11 productos con quinina de venta en España: la concentración de este componente oscilaba entre 54,02 y 98,74 ppm, con una media de 72 ppm. En vista de los resultados, los autores recomendaron indicar en las etiquetas el porcentaje de quinina para evitar problemas en grupos de población sensibles.

Desde el punto de vista gastronómico, el agua tónica se hizo muy popular conforme avanzaba el siglo xx. El *gin-tonic* es hoy una bebida estrella. El consumo de ginebras y aguas tónicas ha crecido tanto que se han desarrollado todo tipo de productos, incluidas aguas tónicas sin quinina, que se sustituye por saborizantes amargos. Desde 2005 han empezado a aparecer en el mercado nuevas aguas tónicas, genéricamente denominadas Premium, a base de quinina, agua de manantial y edulcorantes seleccionados.



THINKSTOCKPHOTO/RA

Una receta básica para el *gin-tonic* consiste en 200 mililitros de agua tónica, 5 mililitros de ginebra seca, tres cubitos de hielo y piel de limón. Se mezcla cuidadosamente en una copa de tipo balón y, sobre todo, se consume bien frío. A bajas temperaturas, el gas queda más retenido en el líquido. Además, el hielo debe deshacerse poco, por lo que, idealmente, deberían usarse cubitos de gran tamaño, compactos y de agua mineral (sin restos de cloro). El consumo no debe alargarse demasiado; pasados unos 15 minutos, el porcentaje de agua es ya excesivo (diluye los sabores iniciales).

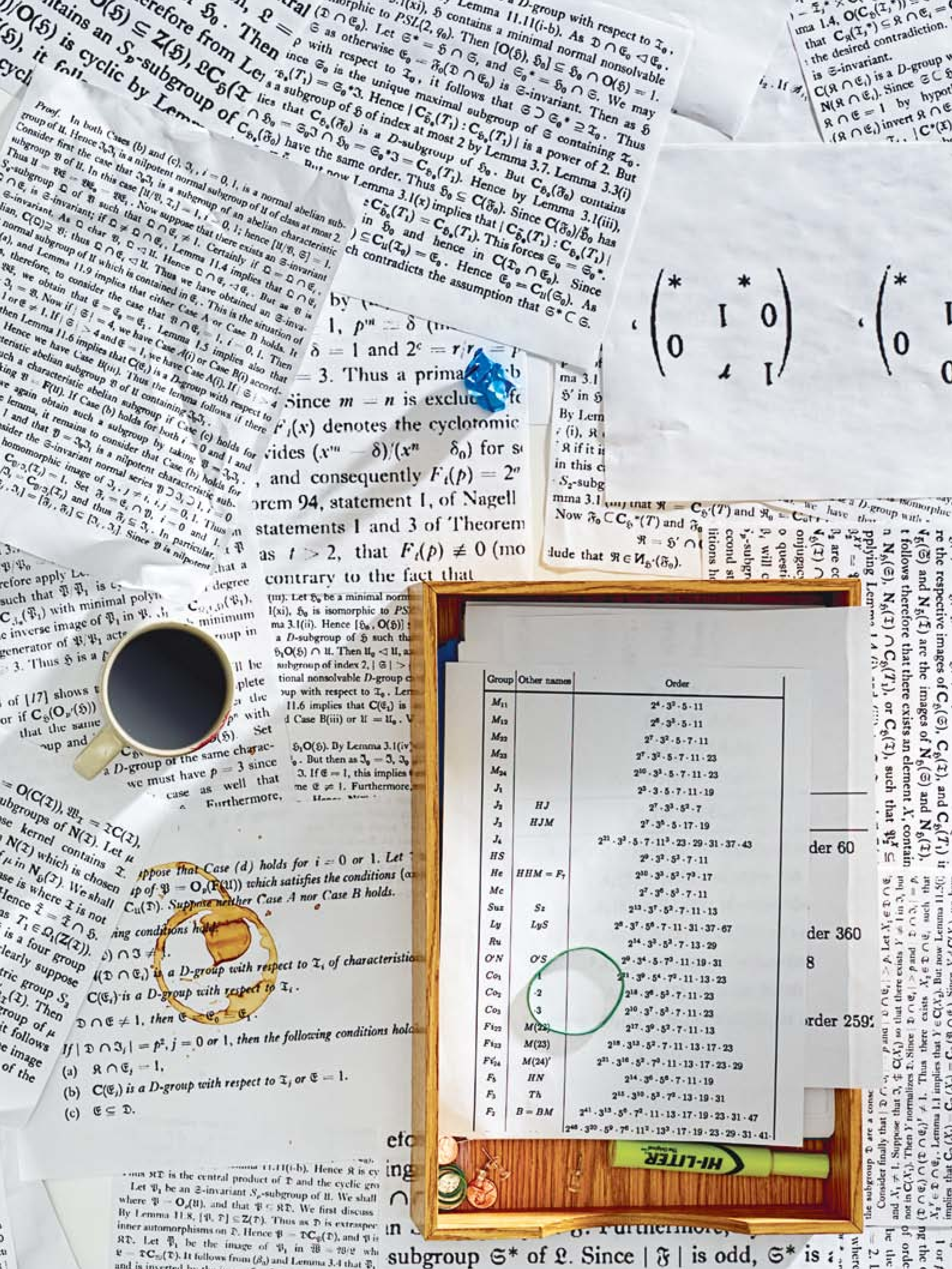
Si continúa la gran popularidad del *gin-tonic*, la industria y los barmans podrán seguir mejorando los productos y personalizándolos con aromatizantes especiales. Y las nuevas texturas que han revolucionado la cocina también podrían aportar aire fresco en los nuevos *gin-tonics*.



El gran catálogo universal

Antes de que caiga para siempre en el olvido, un equipo de matemáticos está intentando resumir las 15.000 páginas que componen la demostración del «teorema enorme», un resultado clave en teoría de grupos

Stephen Ornes



Group	Other names	Order
M_{11}		$2^4 \cdot 3^2 \cdot 5 \cdot 11$
M_{12}		$2^6 \cdot 3^3 \cdot 5 \cdot 11$
M_{22}		$2^7 \cdot 3^2 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11$
M_{23}		$2^7 \cdot 3^2 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 23$
M_{24}		$2^{10} \cdot 3^3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 23$
J_1		$2^3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 19$
J_2	HJ	$2^7 \cdot 3^3 \cdot 5^2 \cdot 7$
J_3	HJM	$2^7 \cdot 3^5 \cdot 5 \cdot 17 \cdot 19$
J_4		$2^{21} \cdot 3^3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 11^3 \cdot 23 \cdot 29 \cdot 31 \cdot 37 \cdot 43$
HS		$2^9 \cdot 3^2 \cdot 5^3 \cdot 7 \cdot 11$
He	$HHM = F_7$	$2^{10} \cdot 3^3 \cdot 5^2 \cdot 7^3 \cdot 17$
Mc		$2^7 \cdot 3^6 \cdot 5^3 \cdot 7 \cdot 11$
Suz	Sz	$2^{13} \cdot 3^7 \cdot 5^2 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13$
Ly	LyS	$2^8 \cdot 3^7 \cdot 5^6 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 31 \cdot 37 \cdot 67$
Ru		$2^{14} \cdot 3^3 \cdot 5^3 \cdot 7 \cdot 13 \cdot 29$
$O'N$	$O'S$	$2^9 \cdot 3^4 \cdot 5 \cdot 7^3 \cdot 11 \cdot 19 \cdot 31$
Co_1	·1	$2^{21} \cdot 3^9 \cdot 5^4 \cdot 7^2 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 23$
Co_2	·2	$2^{18} \cdot 3^6 \cdot 5^3 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 23$
Co_3	·3	$2^{10} \cdot 3^7 \cdot 5^3 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 23$
Fi_{22}	$M(22)$	$2^{17} \cdot 3^9 \cdot 5^2 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13$
Fi_{23}	$M(23)$	$2^{18} \cdot 3^{13} \cdot 5^2 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 17 \cdot 23$
Fi'_{24}	$M(24)'$	$2^{21} \cdot 3^{16} \cdot 5^2 \cdot 7^3 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 17 \cdot 23 \cdot 29$
F_5	HN	$2^{14} \cdot 3^6 \cdot 5^6 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 19$
F_3	Th	$2^{15} \cdot 3^{10} \cdot 5^3 \cdot 7^2 \cdot 13 \cdot 19 \cdot 31$
F_2	$B = BM$	$2^{41} \cdot 3^{13} \cdot 5^6 \cdot 7^2 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 17 \cdot 19 \cdot 23 \cdot 31 \cdot 47$
		$2^{46} \cdot 3^{20} \cdot 5^9 \cdot 7^6 \cdot 11^2 \cdot 13^3 \cdot 17 \cdot 19 \cdot 23 \cdot 29 \cdot 31 \cdot 41 \cdot$

Stephen Ornes es escritor científico especializado en varias áreas, las matemáticas entre ellas. En 2008 publicó una biografía para adolescentes sobre Sophie Germain, matemática francesa de finales del siglo XVIII y principios del XIX.



La comida llenaba las mesas de la casa de Judith L. Baxter y su marido, el matemático Stephen D. Smith, la fría tarde de un viernes de septiembre de 2011. Había canapés, albóndigas caseras, platos de quesos, gambas, pastas, aceitunas, salmón y feta con berenjena. La selección de postres incluía pastel de mascarpone con limón y una tarta africana de calabaza. Con la puesta de sol llegó el champán. Los 60 invitados, más de la mitad de los cuales eran matemáticos, comían, bebían y comían.

Aquel banquete en casa de Baxter y Smith, en Oak Park, Illinois, celebraba la culminación de una obra faraónica. Cuatro de los matemáticos allí presentes (Smith, Michael Aschbacher, Richard Lyons y Ronald Solomon) acababan de publicar una obra que compendiaba 180 años de trabajo, un tratado monumental sobre uno de los problemas de clasificación más importantes de la historia de las matemáticas.

Su libro jamás llegó a ninguna lista de superventas, algo comprensible dado su título: *La clasificación de los grupos simples finitos*. Pero, para los expertos, aquel tomo de 350 páginas marcaba todo un hito, pues constituía una versión resumida del teorema de clasificación al que aludía el título. Hoy por hoy, la demostración completa abarca más de 15.000 páginas (algunos dicen que solo 10.000), esparcidas en cientos de artículos publicados durante décadas por más de un centenar de autores. El resultado fue bautizado, con toda justicia, como «teorema enorme» —aunque en realidad el teorema resulta bastante sencillo de enunciar; es la demostración la que es enorme—. La abundancia en casa de los Smith parecía apropiada para honrar a semejante monstruo. A fin de cuentas, se trata de la demostración más larga de la historia de las matemáticas.

Pero esa demostración se encuentra en peligro. La obra de 2011 no representa más que un esbozo. La cantidad de documentos que incluye la prueba completa la sitúa en el límite de lo que el ser humano es capaz de manejar. «No conozco a nadie que la haya leído entera», apunta Solomon, que se jubiló hace dos años de la Universidad estatal de Ohio y quien, a sus 66 años, ha estudiado el teorema durante toda su carrera. Solomon y los otros tres matemáticos homenajeados probablemente sean las únicas personas vivas que entienden la demostración en su totalidad. Pero su avanzada edad ha comenzado levantar preocupaciones: Smith tiene 67 años; Aschbacher, 71, y Lyons, 70. «Nos estamos haciendo mayores y queremos dejar constancia de estas ideas antes de que sea demasiado tarde», explica Smith.

Semejante pérdida sería tan enorme como el propio teorema. En pocas palabras, este pone orden en la teoría de grupos, la disciplina que se ocupa del estudio matemático de la simetría. Y la simetría resulta clave en varias áreas de la ciencia, como la física de partículas. El modelo estándar, la teoría que describe todas las partículas subatómicas conocidas, depende de manera crítica de la teoría de grupos. El estudio de la simetría ha ayudado a los físicos a discernir qué ecuaciones gobiernan la naturaleza a las escalas más pequeñas y ha servido para deducir la existencia de partículas como los quarks, los constituyentes de los protones y los neutrones.

La teoría de grupos también ha conducido a la idea de que la masa de las partículas elementales, como las que en última instancia forman esta revista o cualquier objeto que podamos ver y tocar, aparece como consecuencia de la ruptura de cierta simetría subyacente en las leyes físicas fundamentales. Tales

PÁGINAS ANTERIORES: ZACHARY ZAVISLAK

EN SÍNTESIS

El «teorema enorme» establece que las piezas fundamentales de los grupos de simetría pueden clasificarse en cuatro grandes familias.

Su demostración, que comprende unas 15.000 páginas, es la más larga de la historia de las matemáticas.

Los pocos matemáticos que la entienden temen morir antes de que una generación más joven tome el relevo.

Los investigadores llevan años trabajando en un gran proyecto que reestructure la demostración y la haga más accesible.

UN EJEMPLO SENCILLO

Las simetrías de un cubo

Si desea entender en qué consiste un grupo de simetría, tome un cubo con todas las caras pintadas del mismo color. Este puede rotarse de varias maneras que hacen que, tras la rotación, su aspecto final resulte indistinguible del inicial. Hay 24 rotaciones independientes que dejan el cubo invariante. Dado que estas no son infinitas, decimos que conforman un grupo finito. Para ver por qué hay 24 rotaciones, siga los pasos del diagrama. En cada caso hemos dibujado un eje imaginario entre caras, aristas y vértices opuestos del cubo. Para visualizar el efecto de cada rotación, en cada estado inicial hemos marcado una de las caras.

Estado inicial

Eje de rotación

Cara marcada (para visualizar el efecto de la rotación)

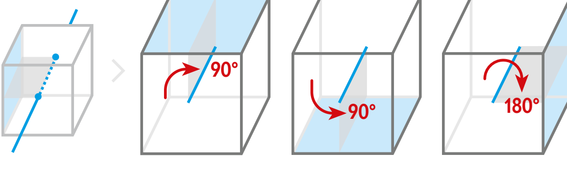
90°

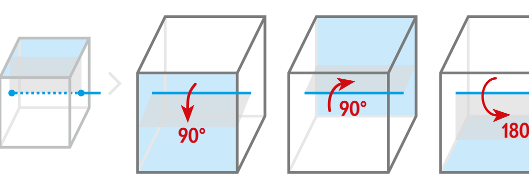
90°

180°

Caras

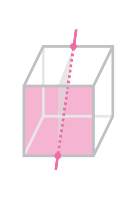
Hay tres pares de caras opuestas. Por cada eje que las conecta, existen 3 rotaciones independientes que dejan invariante el aspecto del cubo: 90 grados en un sentido, 90 grados en el opuesto y 180 grados (en cualquier sentido). Ello da un total de 9 rotaciones distintas.

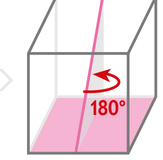


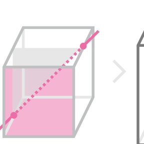


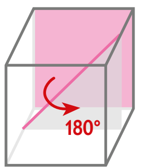
Aristas

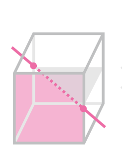
Dado que un cubo tiene 12 aristas, existen 6 pares de ellas que pueden unirse con un eje que pase por el centro. Las únicas rotaciones que dejan el cubo invariante son las de 180 grados alrededor de dichos ejes, lo que arroja un total de 6 rotaciones.

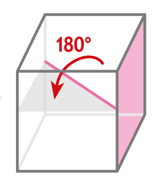


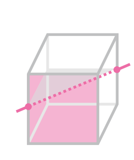


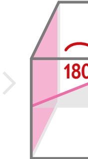


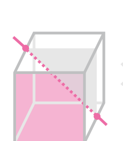


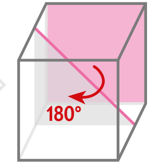


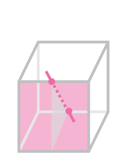


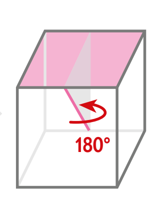






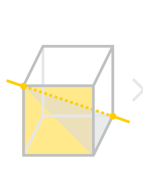


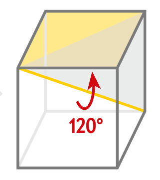


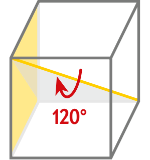


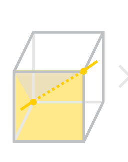
Vértices

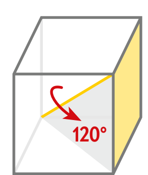
Los 8 vértices de un cubo dan lugar a 4 pares de vértices opuestos y, por tanto, a 4 ejes. El aspecto del cubo permanecerá invariante si lo rotamos alrededor de ellos 120 grados tanto en un sentido como en el otro. En total, 8 rotaciones.

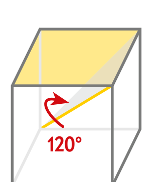


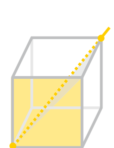


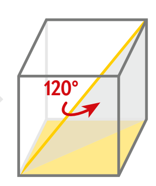


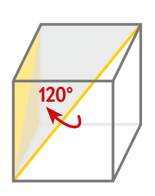


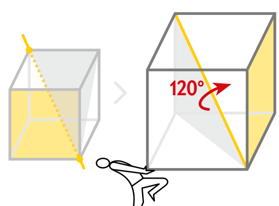


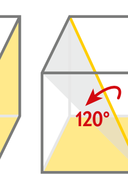












NIGEL HOLMES

planteamientos llevaron hace poco al hallazgo del bosón de Higgs, uno de los mayores hitos en la física de partículas de los últimos años. Aunque fue descubierto en 2012 en los experimentos del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, la existencia de esta partícula había sido anticipada en los años sesenta gracias a consideraciones basadas en la teoría de grupos.

La idea de simetría implica que algo puede sufrir una serie de transformaciones (como rotar, doblarse, reflejarse o moverse a través del tiempo) y, al final, mostrar el mismo aspecto que al principio. Se trata de un concepto ubicuo, aplicable a las configuraciones de quarks en los hadrones y a las de galaxias en el universo.

El teorema enorme demuestra, con la precisión característica de las matemáticas, que toda simetría puede subdividirse y clasificarse en cuatro grandes familias. Para quienes investigan la teoría de grupos, se trata de un resultado no menos impresionante, trascendental o básico que la tabla periódica de los elementos. En el futuro, podría desencadenar nuevos descubrimientos sobre la estructura última del universo y la naturaleza de la realidad.

Con la salvedad, por supuesto, de que la demostración es un galimatías. Las ecuaciones, corolarios y conjeturas que la componen ocupan más de 500 artículos de investigación, cada uno de ellos con su notación particular de símbolos, letras griegas, latinas y demás caracteres que trufan el denso lenguaje matemático. Por si fuera poco, a ese caos debe añadirse el estilo idiosincrásico de cada autor.

El problema reside en que, si se mueve una pieza, toda la construcción se tambalea. Imagine que los más de dos millones de bloques que forman la pirámide de Guiza se encontrasen desperdigados por el desierto y que solo un puñado de personas supiese cómo encajarlos. Sin una demostración manejable del teorema enorme, los matemáticos cuentan con dos posibilidades: creer a pies juntillas el resultado, sin saber a ciencia cierta cómo funciona, o reinventar la rueda. Ningún matemático se sentiría cómodo con la primera opción, y la segunda parece casi imposible.

El resumen publicado en 2011 forma parte de un ambicioso proyecto para hacer que el teorema resulte accesible a la siguiente generación de matemáticos. «Hasta cierto punto, muchos lo usan como una caja negra», se lamenta Solomon. La parte principal de dicho proyecto consiste en confeccionar una demostración simplificada que agrupe las diversas piezas. La idea nació hace más de 30 años, pero por ahora solo está a medio terminar.

Si un teorema es importante, más lo es su demostración. Esta determina en qué condiciones puede aplicarse el teorema y permite que un matemático pueda convencer a otro de la veracidad del enunciado, incluso si entre uno y otro median continentes o siglos de separación. Después, constituirá la base de nuevas conjeturas y nuevos teoremas. Así han progresado las matemáticas durante milenios.

Inna Capdeboscq, de la Universidad de Warwick, es una de las pocas investigadoras jóvenes que ha buceado en los entresijos del teorema enorme. A sus 44 años, calmada y segura de sí misma, se le ilumina el rostro cuando habla sobre la importancia de entenderlo. «¿Qué es clasificar?», se pregunta. «¿Qué significa tener una lista? ¿Sabemos a qué corresponden todos y cada uno

CLASIFICACIÓN DE GRUPOS

Cuatro familias enormes

En general, un grupo de simetría puede dividirse en varios bloques fundamentales. Esas piezas básicas reciben el nombre de grupos simples finitos. Al igual que los elementos químicos, combinarlos permite formar grupos más complejos.

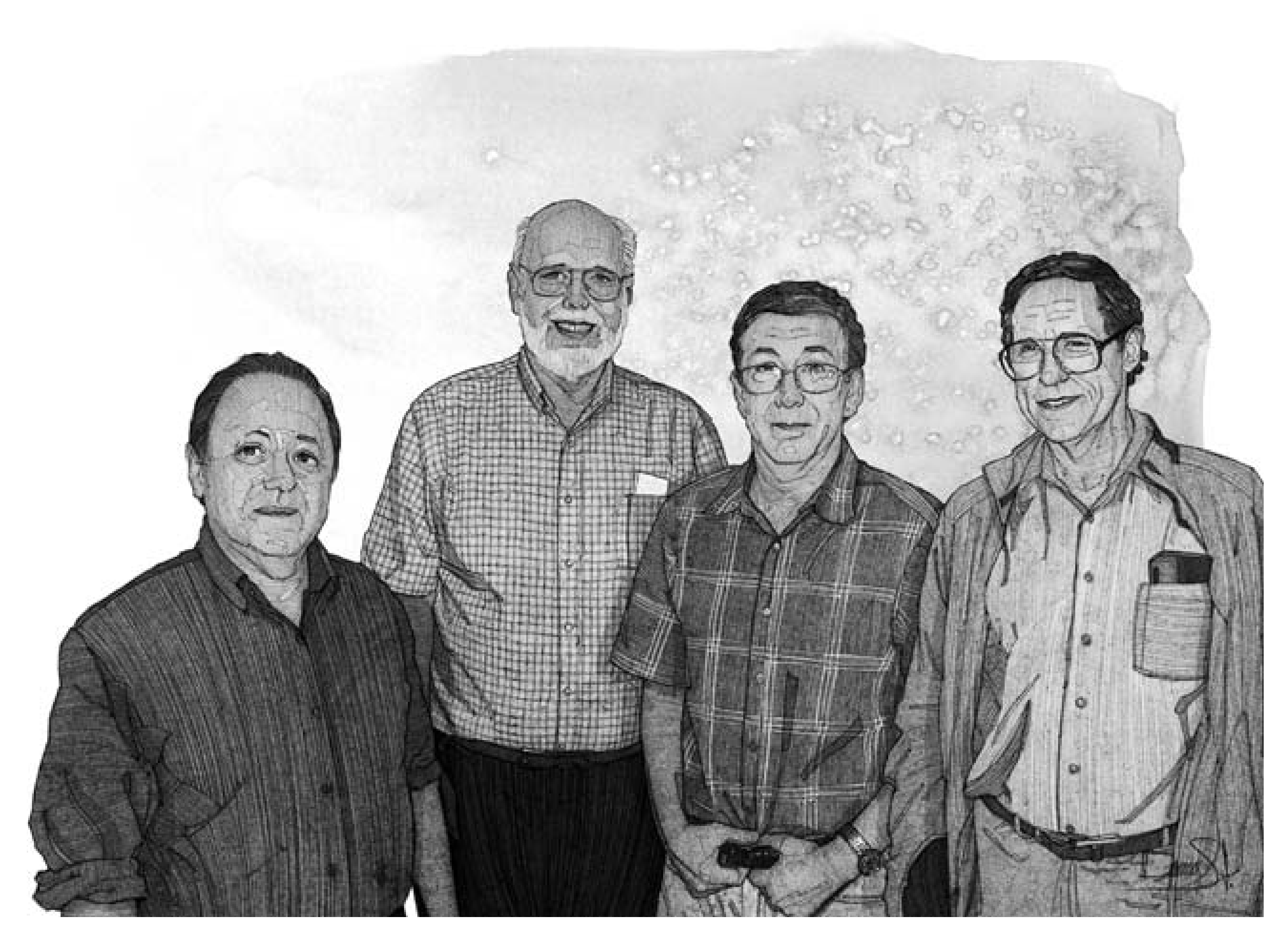
El teorema enorme establece que todos los grupos simples finitos pertenecen a una de cuatro grandes familias. A pesar de la longitud de la demostración, su enunciado es muy corto: «Todo grupo simple finito es un grupo cíclico de orden primo, un grupo alternante de grado mayor o igual que cinco, un grupo simple finito de tipo Lie, o uno de los 26 grupos esporádicos». He aquí una descripción somera de estas familias.

Los grupos cíclicos fueron los primeros en clasificarse. Son aquellos que se repiten tras cierto número de iteraciones. Por ejemplo, si giramos un pentágono regular 1/5 de circunferencia (72 grados), la figura conservará su aspecto. Pero si repetimos la operación cinco veces, volveremos a la posición original. Los grupos cíclicos simples finitos tienen siempre un número primo de elementos, ya que el resto pueden descomponerse en otros grupos menores (y, por tanto, no son simples).

Los grupos alternantes surgen de intercambiar el orden de los elementos de un conjunto. Consideremos los números 1, 2 y 3. Hay seis ordenaciones posibles: (1, 2, 3), (1, 3, 2), (2, 1, 3), (2, 3, 1), (3, 1, 2) y (3, 2, 1). El grupo alternante correspondiente contiene solo tres de las seis permutaciones (las llamadas «permutaciones pares»).

Los grupos «de tipo Lie» resultan más complicados. Están relacionados con los grupos de Lie, así llamados en honor al matemático del siglo XIX Sophus Lie. Estos últimos poseen un número infinito de elementos y se encuentran asociados a ciertas transformaciones continuas, como las rotaciones en el espacio tridimensional (hay infinitas maneras de rotar una figura: una por cada ángulo y eje posibles). Los grupos de tipo Lie finitos se obtienen al restringir mediante ciertas reglas el número de transformaciones permisibles. La mayoría de los grupos simples finitos pertenecen a esta categoría. Los grupos de tipo Lie no están limitados a las tres dimensiones que estamos acostumbrados a experimentar en nuestra vida diaria, sino que pueden existir en espacios de dimensión mucho mayor.

Los grupos esporádicos forman una lista de 26 casos que no encajan en ninguna de las categorías anteriores (imagine que la tabla periódica de los elementos incluyese una columna de «miscelánidos»). El mayor de ellos, llamado «grupo monstruo», tiene más de 10^{53} elementos y puede representarse en 196.883 dimensiones. Constituye un caso extravagante cuyo significado se desconoce, aunque resulta tentador especular sobre él. En 1983, el físico teórico Freeman Dyson dijo: «Tengo la corazonada —no apoyada por prueba alguna— de que los físicos del siglo XXI acabarán topándose con el grupo monstruo en algún lugar insospechado de la estructura del universo».



AL RESCATE: **Ronald Solomon, Richard Lyons, Michael Aschbacher y Stephen D. Smith (*de izquierda a derecha*) temen ser las últimas personas que entienden en su totalidad la demostración del teorema enorme. Hace años que intentan concluir una versión simplificada que resulte manejable para las futuras generaciones de matemáticos.**

STAVROS DAMOS

de los objetos de la lista? En caso contrario, no es más que un manojo de símbolos.»

LOS «ÁTOMOS» DE LA SIMETRÍA

Los matemáticos comenzaron a soñar con una demostración que clasificase los distintos grupos a finales del siglo XIX, cuando la teoría de grupos tomaba forma. En matemáticas, un grupo consiste en una colección de objetos relacionados entre sí por medio de alguna operación. Si aplicamos dicha operación a un elemento del conjunto, obtendremos otro elemento que también pertenecerá al conjunto.

Las simetrías, como la clase de movimientos que dejan inalterado el aspecto de un objeto, encajan en tal descripción. Considere un cubo con todas las caras pintadas del mismo color. Tras rotarlo 90 grados (o 180, o 270), mostrará la misma apariencia que al principio. Si abandona la habitación y permite que un amigo rote el cubo tantas veces como quiera, cuando regrese no tendrá forma de saber lo que ha hecho. En el caso de un cubo hay 24 rotaciones independientes que dejan su aspecto intacto. Dichas rotaciones forman un grupo finito de 24 elementos.

Los grupos simples finitos pueden considerarse análogos a los átomos; son las unidades básicas a partir de las cuales pueden construirse otros grupos mayores y más complejos. Y el teorema enorme los organiza de forma similar a como la tabla periódica organiza los elementos químicos: establece que cada grupo simple finito pertenece, o bien a una de tres grandes familias, o bien a una cuarta que comprende 26 casos excéntricos. El mayor de todos ellos recibe el nombre de «grupo monstruo», cuenta con más de 10^{53} elementos y existe en 196.883 dimensiones. (Un campo de investigación apodado «monstruología» se dedica a buscar signos de esta bestia en la física y en otras ramas de la matemática.) El primer grupo simple finito fue identificado en 1830. Hacia 1890, los matemáticos ya habían logrado varios avances de calado en lo tocante a descubrir más ladrillos fundamentales. Y, al mismo tiempo, comenzaron a sospechar que tales bloques tal vez pudiesen ordenarse en una gran lista.

Los matemáticos de principios del siglo XX allanaron el terreno para el teorema enorme, pero los entresijos de la demostración no se materializaron hasta la segunda mitad del siglo. Entre 1950 y 1980, un período que el matemático Daniel Gorenstein, de la Universidad Rutgers, gustaba llamar «la guerra de los 30 años», los pesos pesados de la teoría de grupos siguieron descubriendo grupos simples y clasificándolos en familias.

Fueron tiempos vibrantes. Richard Foote, por entonces estudiante en la Universidad de Cambridge y ahora profesor de la de Vermont, recuerda un día en que, sentado en un despacho frío y húmedo, presenció cómo los célebres John Thompson, ahora en la Universidad de Florida, y John Conway, hoy en la

de Princeton, discutían los detalles de un grupo particularmente enrevesado: «Fue impresionante, algo así como dos titanes con relámpagos saliendo de sus cabezas. Nunca parecían estar perdidos, a pesar de estar usando técnicas estrafalarias y completamente nuevas».

En aquellas décadas se lograron dos grandes avances que facilitarían la demostración. En 1963, un teorema de Thompson y el ya fallecido Walter Feit, por entonces en Cornell, proporcionó un método para hallar más grupos simples. Y, en 1972, Gorenstein esbozo un plan en 16 pasos para demostrar el teorema enorme: un proyecto que pondría de una vez por todas cada pieza en su sitio. Su plan implicaba juntar todos los grupos simples finitos, encontrar los que faltaban, clasificarlos y demostrar que la lista estaba completa. Se trataba de un proyecto monumental, ambicioso, irreverente... y, para algunos, imposible.

EL HOMBRE DEL PLAN

Gorenstein era un investigador carismático, por lo que su proyecto dio alas a un nuevo grupo de matemáticos —con ambiciones nada simples ni finitas— deseosos de contribuir. «Era todo un personaje», asegura Lyons, que investiga en Rutgers. «Muy beligerante en la forma en que atacaba los problemas y muy persuasivo convenciendo a otros para que le ayudasen.»

Solomon, que describe su primer encuentro con la teoría de grupos como «amor a primera vista», conoció a Gorenstein en 1970. La Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU. organizaba ese año una escuela de verano en la Escuela Universitaria Bowdoin y cada semana varias eminencias daban charlas en el campus. Solomon, por entonces estudiante de doctorado, recuerda a la perfección la visita de Gorenstein. El célebre matemático, recién llegado de su casa de vacaciones en Martha's Vineyard, llenó la escuela de energía con su presencia y su mensaje. «Nunca había visto un matemático con pantalones fucsia», recuerda Solomon.

El investigador asegura que, en 1972, la mayoría de los matemáticos no creían que fuese posible concluir la demostración antes de que acabase el siglo. Pero cuatro años después el final ya estaba a la vista. Gorenstein atribuyó el éxito, en gran parte, al incansable trabajo de Aschbacher, catedrático en el Instituto de Tecnología California, y a los nuevos métodos que este inspiró.

Una de las razones por las que la prueba reviste semejante longitud se debe a la necesidad de demostrar que la lista de grupos es exhaustiva; es decir, que incluye todos los ladrillos fundamentales y que no falta ninguno. A menudo, demostrar que algo no existe (en este caso, demostrar que no existe ningún grupo que no esté en la lista) resulta más difícil que lo contrario.

En 1981 Gorenstein anunció una primera versión de la demostración, pero su alegría resultó prematura. Surgió un problema con una parte especialmente espinosa de 800 páginas que llevó tiempo resolver. En ocasiones, algunos investigadores han afirmado haber encontrado otros fallos en la prueba o grupos que no encajaban en la clasificación, pero a día de hoy ninguna de esas críticas ha pasado el escrutinio de la comunidad matemática. Solomon se encuentra convencido de que la prueba es sólida y sobrevivirá.

Gorenstein enseguida se percató de que la demostración se había convertido en un caótico amasijo de documentos producto de una evolución azarosa. De modo que convenció a Lyons —y, en 1982, ambos persuadieron a Solomon— para que ayudase a realizar una revisión, una presentación más accesible y organizada que debía dar lugar a lo que llamaron «prueba de segunda generación». Su meta era dejar clara la línea argumental a fin de evitar que los que llegasen después tuviesen que descubrirla por ellos mismos, explica Lyons. Además, el esfuerzo serviría para reducir las 15.000 páginas de la demostración a solo 3000 o 4000.

Gorenstein propuso una serie de libros que recopilarían todo el material relevante y eliminarían las redundancias. En los años ochenta, la demostración era inaccesible para cualquiera que no fuese uno de los veteranos que habían trabajado en ella. Una prueba de segunda generación habría permitido que Gorenstein dejase de temer que todo aquel esfuerzo podía haber sido en vano.

Por desgracia, Gorenstein no vivió lo suficiente para ver la última pieza del proyecto en su sitio, ni tampoco para brindar con champán en la fiesta de Smith y Baxter. Murió de cáncer de pulmón en Martha's Vineyard en 1992. «Nunca dejó de trabajar», recuerda Lyons. «El día antes de su muerte hablamos tres veces, todas ellas sobre la demostración. Nada de adioses ni despedidas, solo trabajo.»

DEMOSTRARLO DE NUEVO

El primer volumen de la prueba de segunda generación apareció en 1994. Era más un texto introductorio que un libro estándar de matemáticas e incluía solo dos de las treinta secciones que completarían la demostración del teorema. El segundo tomo se publicó en 1996, y en los años siguientes fueron apareciendo otros. El sexto vio la luz en 2005.

Foote sostiene que las piezas que conforman la segunda demostración encajan mejor que las originales. «Las partes que han aparecido están escritas de forma mucho más coherente y

HISTORIA

Del álgebra a las leyes físicas

Los orígenes de la teoría de grupos se hallan envueltos en tragedia. La disciplina nació en el siglo XIX con Évariste Galois, un joven revolucionario francés cuya pasión por acabar con la monarquía solo podía equipararse con la que sentía por las matemáticas. En su adolescencia —y cuando no estaba en prisión—, Galois exploró métodos innovadores para resolver ecuaciones algebraicas, lo que le llevó a descubrir profundas relaciones entre campos de las matemáticas que se creían inconexos.

Galois fue tan brillante como malhadado. Murió en 1832, a los 20 años de edad, víctima de un disparo en un duelo por amor. Algunos historiadores han sostenido que pudo tratarse de un asesinato; otros, que fue un suicidio o un ejemplo trágico de los peligros de un amor no correspondido. Pero las investigaciones más recientes sugieren que solo una de las pistolas estaba cargada —y, obviamente, no la del joven genio—. «Muero víctima de una infame coqueta y sus dos engañados», escribió en una carta la noche anterior al duelo. En otra carta redactada la misma noche, detalló muchas de sus ideas sobre grupos [*véase* «El legado de Évariste Galois», por Antoine Chambert-Loir; Investigación y Ciencia, septiembre de 2013]. A lo largo del siguiente

siglo, la disciplina iniciada por un joven la noche antes de su muerte floreció hasta convertirse en un área madura.

En matemáticas, un grupo es un conjunto cuyos elementos se encuentran conectados por alguna operación. Los números enteros, por ejemplo, forman un grupo bajo la adición, ya que la suma de dos enteros es un entero. Las rotaciones que preservan la forma de un objeto también son un grupo. Los químicos usan la teoría de grupos para describir las simetrías de una molécula o las de un cristal, un aspecto clave para determinar sus propiedades. Algunas de las matemáticas usadas para cifrar datos (y romper códigos), como la criptografía de clave pública, están basadas en la teoría de grupos.

Tras la muerte de Galois, los matemáticos se lanzaron a la construcción y deconstrucción de grupos. Al principio parecía un ejercicio formal, pero en los albores del siglo XX la matemática alemana Emmy Noether halló una profunda conexión entre las simetrías de las leyes físicas (y, por tanto, la teoría de grupos) y las leyes de conservación (como la conservación de la energía). Aquel brillante trabajo allanó el camino para que los físicos teóricos aprendiesen a usar la teoría de grupos para entender las simetrías fundamentales de las leyes de la naturaleza y predecir la existencia de partículas subatómicas. De esta manera, la teoría de grupos creció más allá de su ámbito inicial y se convirtió en una poderosa herramienta para describir la realidad física.

mejor organizadas», asegura. «Desde una perspectiva histórica, es importante que la demostración se encuentre localizada en un sitio. De otro modo la prueba se convierte en una especie de folclore: incluso si crees que el teorema ha sido demostrado, no puedes verificarlo.»

Solomon y Lyons tenían planeado concluir el séptimo volumen este verano; mientras tanto, un pequeño grupo de matemáticos ha comenzado ya a trabajar en el octavo y el noveno. Solomon calcula que la demostración completa ocupará diez u once tomos, lo que significa que más de la mitad de la demostración revisada ya ha aparecido.

Con todo, el investigador recuerda que esos diez u once volúmenes no completarán la prueba de segunda generación. Incluso esta incluirá referencias a material suplementario o resultados previos publicados en otros sitios. En cierto sentido, se trata de la naturaleza acumulativa de las matemáticas: cada demostración es producto no solo de su tiempo, sino de milenios de pensamiento.

En 2005, en un artículo publicado en *Notices of the American Mathematical Society*, el matemático E. Brian Davies, del King's College de Londres, escribió: «La demostración nunca se ha escrito por completo, puede que nunca se escriba y, tal y como la concebimos ahora, siempre quedará fuera del alcance de un solo individuo». Su artículo puso sobre la mesa la incómoda idea de que algunos resultados matemáticos tal vez sean demasiado complejos para que los entiendan los simples mortales. Las palabras de Davies llevaron a Smith y a sus tres coautores a escribir un compendio: el volumen cuya publicación se celebró en la fiesta de Oak Park.

Puede que la demostración del teorema enorme quede fuera del alcance de la mayoría de los matemáticos —por no hablar de los simples curiosos—, pero reorganizarla aportará una herramienta útil de cara al futuro. Los matemáticos cuentan con una larga tradición de demostrar resultados y solucionar problemas décadas o incluso siglos antes de que se revelen útiles en otros campos. «Una de las cosas que hacen el futuro emocionante es la dificultad para predecirlo», dice Solomon. «Nuevos genios vienen con ideas que nadie antes ha concebido. Existe la posibilidad y el deseo de que una manera más profunda de entenderlo esté esperándonos ahí fuera.»

LA SIGUIENTE GENERACIÓN

Estas décadas de profunda reflexión no solo han hecho avanzar el campo, sino que han ayudado a construir una comunidad. Judith Baxter, la esposa de Smith, es matemática de formación. Asegura que quienes trabajan en teoría de grupos forman un colectivo inusitadamente sociable. «A menudo son amigos para toda la vida», observa.

El deseo de preservar las ideas de la comunidad que dio con la primera demostración ha llevado a Solomon y Lyons a reclutar a otros matemáticos para que les ayuden a concluir la segunda. Pero no se trata de una tarea sencilla: muchos matemáticos jóvenes ven la prueba del teorema enorme como algo ya concluido, por lo que prefieren contribuir a nuevos avances. Además, trabajar para reescribir una demostración ya existente exige una temeraria pasión por la disciplina. Solomon ha encontrado una devota en Capdeboscq, una de las investigadoras jóvenes que se ha decidido a colaborar en la prueba de segunda generación. Capdeboscq reconoce que cayó presa de la teoría de grupos tras asistir a un curso impartido por Solomon.

«Para mi sorpresa, recuerdo leer y hacer ejercicios mientras pensaba lo fascinante que era», apunta la investigadora. Quedó seducida por la idea de trabajar en la segunda demostración después de que Solomon la invitase a completar algunos detalles que aún faltaban en el sexto volumen. Capdeboscq sostiene que reestructurar una demostración permite encontrar nuevos atajos para resolver problemas.

La investigadora compara la tarea con la de depurar un borrador. Gorenstein, Lyons y Solomon trazaron el plan, pero el trabajo de convencerse de que todas piezas encajan es suyo y del resto de los nuevos matemáticos que se sumen al proyecto. «Tenemos el mapa. Si lo seguimos, al final deberíamos dar con la demostración.»

PARA SABER MÁS

The classification of the finite simple groups: A personal journey. The early years». Daniel Gorenstein en *A century of mathematics in America*, parte I. Dirigido por Peter Duren, Richard A. Askey y Uta C. Merzbach. American Mathematical Society, 1998. **www.ams.org/samplings/math-history/hmath1-gorenstein33.pdf**

A brief history of the classification of the finite simple groups. Ronald Solomon en el *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 38, n.º 3, págs. 315-352, marzo de 2001. **www.ams.org/journals/bull/2001-38-03/S0273-0979-01-00909-0**

The equation that couldn't be solved: How mathematical genius discovered the language of symmetry. Mario Livio. Simon & Schuster, 2005.

Symmetry and the monster: One of the greatest quests in mathematics. Mark Ronan. Oxford University Press, 2006.

EN NUESTRO ARCHIVO

El teorema enorme. Daniel Gorenstein en *IyC*, febrero de 1986.

INGENIERÍA AEROESPACIAL

CRÓNICA DE LA LLEGADA A OTRO MUNDO

En 2012, la cápsula del Laboratorio Científico para Marte realizó el primer vuelo guiado a través de una atmósfera extraterrestre. Su exitosa experiencia ayudará a planificar las futuras misiones al planeta rojo

Eduardo García Llama



APROXIMACIÓN A MARTE: Gracias a una entrada atmosférica guiada, el vehículo explorador *Curiosity* logró aterrizar sobre la superficie de Marte con una precisión mucho mayor que la de todas las misiones precedentes. Esta recreación artística muestra la cápsula de entrada, ya desacoplada del módulo de servicio, pocos minutos antes de penetrar en la atmósfera marciana.

Eduardo García Llama es licenciado en física aplicada por la Universidad Autónoma de Madrid y máster de ingeniería en operaciones espaciales por la Universidad de Colorado. Ha trabajado en el Centro Europeo de Investigación y Tecnología Espacial, de la ESA, y actualmente lo hace en la sección de mecánica de vuelo del Centro Espacial Johnson de la NASA, en Houston.



El 6 de agosto de 2012

el vehículo explorador *Curiosity* aterrizó con gran éxito sobre la superficie de Marte. El hoy ya célebre robot viajó hasta el planeta rojo en la cápsula de entrada atmosférica del Laboratorio Científico para Marte (MSL, por sus siglas en inglés), una ambiciosa misión de la NASA destinada a estudiar el clima, la geología y la habitabilidad del planeta vecino.

El vehículo se posó a los pies de la vertiente noroccidental del Aeolis Mons, la cima central del cráter de Gale, una estructura de 154 kilómetros de diámetro formada a partir del impacto de un meteorito hace entre 3500 y 3800 millones de años. Tras un viaje de ocho meses y 568 millones de kilómetros recorridos, *Curiosity* aterrizó a tan solo 2,4 kilómetros del lugar inicialmente previsto, lo que supuso el aterrizaje más preciso en la larga historia de vuelos al planeta rojo. Aquel acierto fue posible gracias a un aspecto novedoso y poco conocido de la misión: su vuelo guiado a través de la atmósfera marciana. El acontecimiento marcó un hito en la historia de la exploración espacial, ya que hasta entonces ninguna nave había penetrado una atmósfera extraterrestre de forma guiada.

En el pasado, han sido numerosas las sondas robóticas que han atravesado la atmósfera de otros mundos, a menudo para descender sobre su superficie. El 15 de diciembre de 1970, la nave soviética *Venera 7* hizo historia al posarse con éxito sobre Venus, lo que la convirtió en la primera sonda que aterrizaba en un mundo extraterrestre dotado de atmósfera. Durante los quince años siguientes, otras naves de la serie Venera y del programa Vega, liderado por la URSS, también lograron descender sobre Venus. En Marte, el primer aterrizaje exitoso se atribuye a la sonda *Viking 1*, de la NASA, llegada al planeta rojo el 20 de julio de 1976. Unos años antes, las naves soviéticas *Mars 3* y *Mars 6* consiguieron hacer contacto con el suelo marciano, pero la comunicación con ellas se perdió inmediatamente. A la *Viking 1* le seguirían la segunda de su serie y, a partir de 1997, la sonda *Mars Pathfinder*, los vehículos *Opportunity* y *Spirit* y la nave *Phoenix*, todas ellas de la NASA. El otro aterrizaje exitoso en un mundo extraterrestre con atmósfera tuvo lugar el 14 de junio de 2005, cuando la sonda *Huygens*, de la ESA, se posó sobre Titán, la luna de Saturno.

En todos esos casos, los vuelos atmosféricos se realizaron de forma no guiada; es decir, con configuraciones aerodinámicas fijas y sin la opción de ejecutar maniobras. Durante un vuelo no guiado, el vehículo se encuentra a merced de los elementos atmosféricos y de los efectos derivados de diversos factores. Entre ellos, la imposibilidad de contar con una caracterización aerodinámica exacta de la nave, las pequeñas imperfecciones que haya podido haber en su construcción, los defectos en el desempeño del sistema de control, o las imprecisiones en las condiciones de velocidad y posición que pueden darse al llegar al mundo de destino.

Por el contrario, una entrada atmosférica guiada implica dotar a la sonda de la capacidad de maniobra y la lógica necesarias para corregir los efectos de las perturbaciones que puedan surgir en el curso del vuelo. Ello consigue reducir de manera notable la elipse de aterrizaje, el área en torno al punto de descenso inicialmente previsto en que se considera probable que la nave acabe posándose. Garantizar una elipse de aterrizaje reducida resulta esencial desde el punto de vista científico, ya que asegura el acceso a las zonas de interés y disminuye el tiempo y los valiosos recursos empleados por los vehículos exploradores en sus desplazamientos.

EN SÍNTESIS

Atravesar la atmósfera de otro mundo para aterrizar en él no es tarea sencilla. Los vuelos atmosféricos guiados permiten dotar a la nave de la capacidad de maniobra necesaria para contrarrestar las perturbaciones que puedan surgir durante la travesía.

Hasta hace poco, la técnica solo se había empleado en la reentrada atmosférica de los vuelos tripulados en su regreso a la Tierra. En 2012, la cápsula del Laboratorio Científico para Marte ejecutó la primera entrada guiada en una atmósfera extraterrestre.

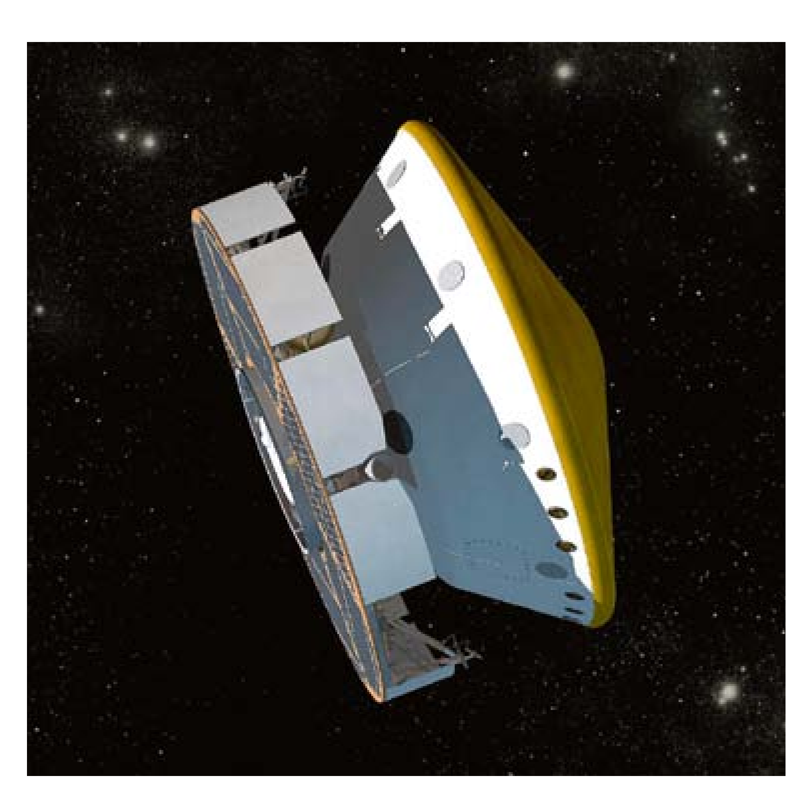
La misión logró que el vehículo explorador *Curiosity* se posase a tan solo 2,4 kilómetros del lugar de aterrizaje previsto, situado en el interior de un cráter de gran interés científico. Ello supuso un éxito sin precedentes en la larga historia de vuelos a Marte.

Los análisis posteriores han revelado qué perturbaciones influyeron en la trayectoria y han sugerido posibles mejoras en el sistema de navegación y la fase de descenso. Las lecciones aprendidas resultarán clave en el diseño de las misiones futuras al planeta rojo.

PÁGINAS PRECEDENTES: NASA/JPL-CALTECH

A lo largo de la historia de la exploración espacial, los vuelos atmosféricos guiados se han venido usando durante el regreso a la Tierra de las misiones tripuladas. Comenzaron a mediados de los años sesenta con el programa estadounidense Gemini y el soviético Soyuz, con el objetivo de que los astronautas amerizasen y aterrizasen lo más cerca posible de los equipos de rescate. Desde entonces, el guiado atmosférico se ha usado en la reentrada de todos los programas espaciales tripulados, desde las misiones Apolo hasta las del transbordador espacial, y también será utilizado en las futuras cápsulas tripuladas *Orion*, en las que actualmente trabaja la NASA.

A pesar de esa larga experiencia con vuelos atmosféricos guiados, hasta ahora estos nunca se habían empleado para entrar en otros mundos con atmósfera. Ello obedece principalmente a tres razones. En primer lugar, una entrada atmosférica guiada entraña mayor complejidad que una no guiada, por lo que supone mayores costes de desarrollo. Por otro lado, no merece la pena realizar un aterrizaje muy preciso en otro mundo si no se conocen bien sus zonas de interés. Por último, diseñar con fiabilidad un vuelo atmosférico guiado requiere conocer adecuadamente las características de la atmósfera en cuestión. En la Tierra, estas pueden medirse y pronosticarse con gran exactitud y de manera casi instantánea, pero ese grado de precisión no es aún posible en otros mundos.



CONFIGURACIÓN DE CRUCERO: Durante la travesía interplanetaria, la nave de la misión Laboratorio Científico para Marte estuvo compuesta por el módulo de servicio (*izquierda*) y la cápsula de entrada atmosférica (*derecha*), en cuyo interior se alojaba el vehículo explorador *Curiosity* (*recreación artística*).

NASA/JPL-CALTECH

En el caso de Marte, las sucesivas misiones orbitales, de sobrevuelo y de aterrizaje enviadas durante los últimos años al planeta rojo nos han permitido conocer su geografía y las propiedades de su superficie con un grado de detalle suficiente para seleccionar regiones de aterrizaje atractivas. Además, sus condiciones atmosféricas han podido caracterizarse con la fidelidad necesaria para que, hoy por hoy, sí resulte posible acometer vuelos guiados con ciertas garantías.

La experiencia del MSL será de gran utilidad para las misiones futuras. Los análisis posteriores al vuelo mostraron que los sistemas de guiado y control funcionaron conforme a las expectativas. Además, el estudio de la entrada atmosférica de la cápsula del MSL ha sugerido cómo perfeccionar el sistema de navegación y otros aspectos del descenso. En los años venideros, estas lecciones no solo beneficiarán a las misiones robóticas similares al MSL, sino también a otras muy distintas, como la propuesta para traer a la Tierra muestras de suelo marciano, el envío de un posible laboratorio astrobiológico o, a largo plazo, los vuelos tripulados al planeta vecino.

LA HERENCIA DE LAS MISIONES APOLO

Aunque las características de la atmósfera marciana se conocen hoy con bastante detalle, los modelos sobre ella adolecen aún de incertidumbres considerables. La atmósfera de Marte es, además, muy dinámica. Por ello, uno de los principales retos a la hora de elegir el sistema de guiado para el MSL fue asegurar su robustez bajo un amplio abanico de condiciones atmosféricas.

Con pequeñas variaciones, la lógica de guiado atmosférico que empleó la cápsula de entrada del MSL fue la misma que usaron las naves del programa Apolo al regresar a la Tierra. Tras evaluar cinco algoritmos de guiado diferentes, el de las misiones Apolo resultó elegido por sus buenas prestaciones, su simplicidad y su robustez. Con pocas líneas de código (alrededor de 300), este algoritmo se situó siempre entre los dos mejores en todos los criterios de desempeño aplicados durante el proceso de selección.

Dicho guiado es uno de tipo «implícito por control terminal». Los guiados implícitos parten de una trayectoria de referencia previamente determinada y almacenada en la memoria de a bordo. Los explícitos, por el contrario, no usan ninguna trayectoria de referencia, ya que sus cálculos se basan en predicciones numéricas o analíticas de la trayectoria realizadas a bordo en tiempo real. En los implícitos, la trayectoria de referencia, también llamada nominal, se corresponde con la que debería seguir la nave en caso de no experimentar perturbación alguna. Dicha trayectoria sirve para especificar los valores de referencia de los diferentes parámetros físicos en función de la velocidad de la cápsula en cada instante.

Los guiados implícitos pueden ser de dos tipos: de control de ruta o de control terminal. En ambos casos, la lógica de guiado determina las maniobras aerodinámicas que debe ejecutar la nave para corregir los efectos de las perturbaciones que puedan surgir durante el vuelo. En un guiado por control de ruta, tales correcciones intentan que la nave siga fielmente la trayectoria de referencia. En cambio, en uno por control terminal se persigue que las condiciones deseadas de posición (latitud, longitud y altitud), velocidad y rumbo se consigan al final de la trayectoria guiada, sin que esta tenga por qué coincidir con la nominal. Las correcciones necesarias se dictan de forma autónoma y en tiempo real en función de la diferencia entre las condiciones reales de vuelo, determinadas por el

Siete minutos críticos

Desde la entrada atmosférica de la cápsula del MSL hasta el aterrizaje del vehículo explorador *Curiosity* transcurrieron aproximadamente siete minutos. La fase guiada del vuelo (*azul*) constó de dos etapas. La primera trató de ajustar la distancia longitudinal (*horizontal en este esquema*) al punto en que estaba previsto que se abriese el paracaídas. La segunda sirvió para controlar la distancia transversal (*perpendicular al papel*). A la fase guiada siguieron las de descenso y aterrizaje. En un vuelo guiado, el control de la trayectoria se logra variando la dirección de la fuerza de sustentación aerodinámica mediante maniobras de balanceo (*abajo*).

Separación del módulo de servicio

t = –10 min

Inicio de la entrada atmosférica

t = 0 s
h = 125,0 km
v = 5,845 km/s
d_L = 631,98 km
d_T = 7,87 km

Inicio de la etapa de control del alcance longitudinal

t = 46 s
h = 58,6 km
v = 5,863 km/s
d_L = 378,35 km
d_T = 7,77 km

Máximo calentamiento

Máxima desaceleración

Inicio de la etapa de ajuste del rumbo

t = 136 s
h = 14,0 km
v = 1,100 km/s
d_L = 83,24 km
d_T = 2,95 km

Despliegue del paracaídas

t = 259 s
h = 12,1 km
v = 0,406 km/s
d_L = 4,96 km
d_T = 0,32 km

Separación del escudo térmico

Toma de datos por radar

Inicio del descenso propulsado (separación de la cápsula)

t = 376 s
h = 1,7 km
v = 0,079 km/s
d_L = –2,09 km
d_T = 0,33 km

Descenso

Aterrizaje

t = 432 s
h = 0 km
v = 0,600 m/s
d_L = –2,33 km
d_T = 0,51 km

Partida del módulo de descenso

t = tiempo
h = altitud
v = velocidad
d_L = distancia longitudinal al punto de aterrizaje previsto
d_T = distancia transversal al punto de aterrizaje previsto

La altitud y la velocidad son relativas al terreno.
El gráfico no se encuentra a escala.



Fuerza de sustentación

Durante la fase guiada, los ajustes de la trayectoria se consiguen modulando la fuerza de sustentación, el empuje perpendicular al flujo aerodinámico que hace que una aeronave no se desplome. Esta fuerza aparece cuando la cápsula vuela con un ángulo de ataque (*magenta*), el cual solo se genera si el centro de masas (*punto blanco*) se encuentra desplazado del eje de simetría. Para lograr un control adecuado, la cápsula debe penetrar en la atmósfera con un cierto ángulo de trayectoria (*azul*).

Maniobras de balanceo

Las componentes vertical y horizontal de la fuerza de sustentación se controlan modificando el ángulo de balanceo (*derecha*). En esta figura, el vector velocidad apunta hacia el lector. El control de la componente vertical permite ajustar la distancia longitudinal recorrida por la nave; modular la componente horizontal sirve para ajustar el rumbo, o la distancia transversal al objetivo. La cápsula de entrada del MSL ejecutó dichas maniobras gracias a un sistema de control compuesto por cuatro pares de motores cohete (*no mostrados*).

NASA/JPL-CALTECH (*imágenes*); EDUARDO GARCÍA LLAMA (*vectores y datos de vuelo*)

sistema de navegación de a bordo, y las preestablecidas en la trayectoria de referencia.

Debido a las características físicas de la nave, las particularidades de la atmósfera marciana y los objetivos de la misión, la trayectoria de referencia del MSL fue muy diferente de las que usaron en su día las naves del programa Apolo para regresar a la Tierra. Uno de los aspectos que más influyeron en el diseño de la trayectoria tuvo que ver con la baja densidad de la atmósfera marciana, unas cien veces menor que la terrestre. Esta particularidad provoca que las sondas que entran en Marte (con velocidades de varios miles de kilómetros por hora) experimenten el mayor frenado a altitudes bajas, donde la densidad atmosférica es mayor. Dependiendo de las características de la cápsula de entrada, la nave puede no llegar a frenarse hasta las velocidades subsónicas requeridas para el inicio de la fase retropropulsada, encargada de depositar la sonda con suavidad sobre la superficie marciana. Este fue el caso en el MSL, y fue por esta razón que entre el final de la fase guiada y el comienzo de la retropropulsada fue necesario intercalar una fase de descenso con paracaídas, a fin de que la nave se decelerase hasta alcanzar velocidades subsónicas.

Hay un gran número de tareas que la nave debe ejecutar durante el descenso después de haber desplegado el paracaídas. Por ello, uno de los aspectos más importantes en el diseño de la trayectoria de referencia fue conseguir un perfil que maximizara la altitud a la que se abriría el paracaídas. Asimismo, la trayectoria nominal debía ofrecer a la nave un margen de maniobra suficiente para contrarrestar las posibles perturbaciones que pudieran presentarse durante el vuelo. Junto con la necesidad de que la desaceleración máxima no superase el límite estructural de la nave, estos fueron los principales requisitos a la hora de trazar la trayectoria de referencia del MSL.

ENTRADA EN LA ATMÓSFERA MARCIANA

La fase de entrada atmosférica comienza al final del vuelo interplanetario, en un punto situado aún en el espacio pero relativamente cercano a las capas altas de la atmósfera. Dicho punto recibe el nombre de interfaz de entrada. Esta queda definida por una posición geográfica y una altitud que, para Marte y en el programa estadounidense, se encuentra históricamente establecida en 125 kilómetros.

La nave debe llegar a la interfaz de entrada con un ángulo específico entre su vector velocidad y la horizontal local. Este ángulo, llamado ángulo de trayectoria, debe alcanzarse con gran precisión si se desea controlar adecuadamente la entrada atmosférica. Ocho días antes de llegar a la interfaz de entrada, las soluciones de la órbita de transferencia interplanetaria indicaban que la cápsula del MSL incidiría con una desviación de 0,16 grados con respecto al ángulo previsto, establecido en 15,5 grados. Gracias a una última maniobra de corrección de trayectoria, esa diferencia consiguió reducirse a tan solo 0,026 grados.

La cápsula del MSL atravesó la interfaz de entrada a una velocidad de 5,8 kilómetros por segundo (km/s), casi 21.000 kilómetros por hora. La fase de entrada atmosférica concluyó 4 minutos y 19 segundos después, en el punto en que se desplegó el paracaídas, a unos 11 km de altitud y a 0,4 km/s, lo que equivale a 1,7 veces la velocidad del sonido en Marte. Tras la apertura del paracaídas, la nave ejecutó las fases de descenso y de aterrizaje, las cuales ya no fueron guiadas. A pesar de su corta duración, durante la fase de entrada atmosférica la energía cinética de la nave se redujo en un 99 por ciento y la cápsula recorrió el 99 por ciento de la distancia entre la interfaz de entrada y el punto de aterrizaje.

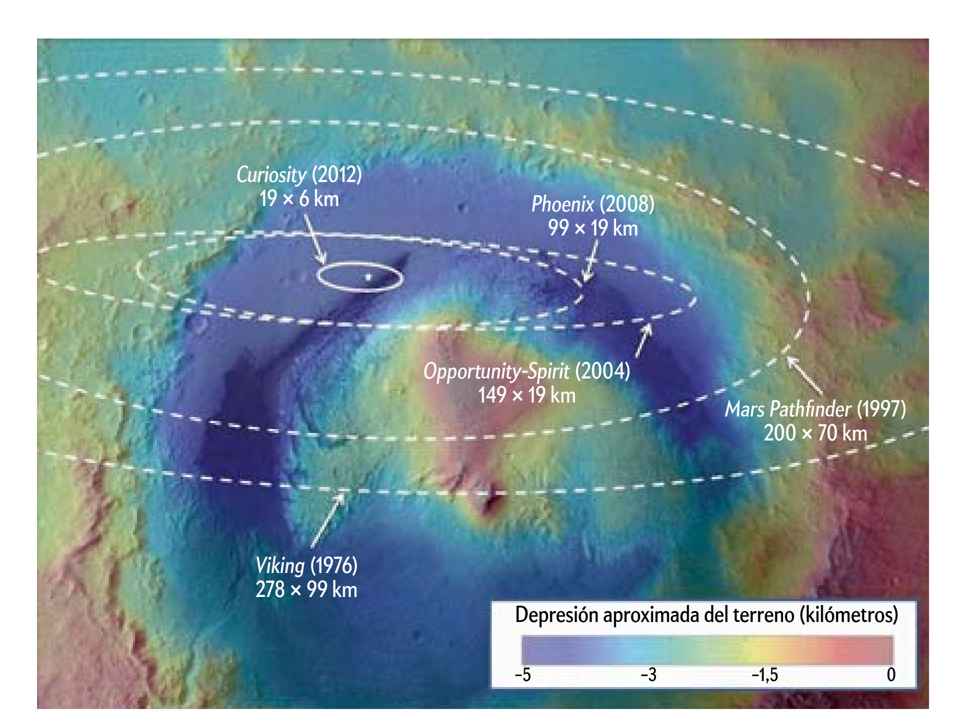
La nave del MSL constaba de varias partes que fueron separándose en las distintas etapas de la misión. Durante el vuelo interplanetario, el módulo de servicio y la cápsula de entrada, que albergaba el vehículo explorador *Curiosity*, se mantuvieron unidos girando a dos revoluciones por minuto a fin de propiciar la estabilidad giroscópica del conjunto. Diez minutos antes de llegar a la interfaz de entrada, el módulo se desacopló para que la cápsula efectuara sola el vuelo atmosférico. Una vez desprendida, esta realizó varios encendidos de su sistema de control, formado por cuatro pares de pequeños motores cohete, para detener su giro y maniobrar hasta lograr la orientación de entrada requerida.

Hasta el momento de la separación, y con objeto de permitir la referida estabilidad giroscópica, el centro de masas de la cápsula estuvo contenido en el eje de giro, que era también el de simetría de la nave. Sin embargo, de haber afrontado la entrada atmosférica con el centro de masas situado sobre el eje de simetría, la cápsula habría acometido una «entrada balística»; es decir, una en la que no existe sustentación aerodinámica, sino solo frenado. La sustentación es la fuerza perpendicular al flujo de aire que, por ejemplo, hace que un avión se mantenga en vuelo. Generarla resulta fundamental en los trayectos atmosféricos guiados, ya que es el ajuste de esta fuerza lo que permite controlar la distancia recorrida transversal y longitudinalmente y, en última instancia, acercarse lo máximo posible al punto deseado.

Para generar una sustentación aerodinámica durante el tránsito atmosférico, la cápsula eyectó dos lastres de 75 kilos antes de atravesar la interfaz de entrada. Con ello logró que su centro de masas se desplazase unos centímetros del eje de simetría. Ese pequeño desplazamiento permite que, en presencia del flujo aerodinámico que se experimenta en la atmósfera, aparezca un momento que hace que la nave vuele con un cierto ángulo de ataque (el que forman el vector velocidad y el eje de simetría), lo que a su vez implica la generación de una fuerza de sustentación aerodinámica. En el caso del MSL, el ángulo de ataque fue de 16 grados, suficiente para producir la fuerza de sustentación requerida para controlar la trayectoria.

Durante el tránsito atmosférico, la cápsula gobierna las componentes vertical y horizontal del vector de sustentación mediante maniobras dictadas por la lógica de guiado y ejecutadas por los pequeños motores cohete del sistema de control. Dichas maniobras se basan en ajustar el ángulo de balanceo; es decir, el ángulo de giro de la cápsula alrededor del vector velocidad. Puesto que la fuerza de sustentación es perpendicular al vector velocidad, un giro alrededor de este cambiará las componentes vertical y horizontal de la sustentación (*véase el recuadro* «Siete minutos críticos»). La distancia longitudinal que la nave recorre dentro de la atmósfera se controla modificando la componente vertical de la sustentación, mientras que la distancia transversal se regula ajustando su componente horizontal.

Una vez eyectados los lastres y con la nave en la orientación de entrada adecuada (con el escudo térmico posicionado para enfrentar el flujo aerodinámico, con un ángulo de ataque igual al esperado al entrar en la atmósfera, y con un ángulo de balanceo coincidente con el que se estimó que sería comandado por el guiado en el momento de iniciar las operaciones), la nave entró en modo de espera hasta que penetró algo más en la atmósfera marciana y se dieron la condiciones necesarias para que la lógica de guiado se pusiese en marcha.



PRECISIÓN CRECIENTE: Las sucesivas misiones a Marte han conseguido reducir cada vez más la elipse de aterrizaje, el área en que se considera probable que la nave acabe aterrizando. Esta imagen muestra las elipses de aterrizaje de las distintas misiones del programa estadounidense proyectadas sobre el cráter de Gale, el lugar en que se posó *Curiosity*. Aunque las misiones Pathfinder, Opportunity y Phoenix ejecutaron entradas balísticas (sin sustentación), las continuas medras pueden atribuirse a las mejoras en la navegación interplanetaria y en la aproximación a Marte. Con todo, reducir el eje mayor de la elipse de aterrizaje por debajo de los 60 kilómetros exige ejecutar una entrada atmosférica guiada.

LA FASE GUIADA DEL MSL

El guiado usado por el MSL consta de dos etapas. La primera persigue controlar el alcance longitudinal de la nave. Comienza cuando la cápsula experimenta una desaceleración determinada debido a su encuentro con las capas más altas de la atmósfera; a partir de ese momento, se entiende que la presión dinámica ya es lo bastante alta para que las maniobras aerodinámicas surtan efecto. Para el MSL, dicha desaceleración se estableció en 0,2*g*, o 0,2 veces la aceleración de la gravedad terrestre, lo que equivale a 1,96 m/s^2. Ese frenado se alcanzó a unos 59 km de altitud, 46 segundos después de atravesar la interfaz de entrada.

Durante esta primera etapa, que tuvo una duración de 1,5 minutos, la nave controló el recorrido longitudinal para alcanzar el objetivo; es decir, el punto en que debía desplegarse el paracaídas. A tal fin, el sistema de guiado compara los datos de navegación con la trayectoria de referencia. Si calcula que la nave acabará sobrevolando el punto de destino, comandará la reducción de la componente vertical de la sustentación mediante un aumento en el ángulo de balanceo, lo que aumentará la velocidad del descenso. Si, por el contrario, prevé que se quedará corta en su distancia longitudinal al objetivo, incrementará la componente vertical de la sustentación reduciendo el ángulo de balanceo; como consecuencia, el descenso no procederá tan rápido y la cápsula recorrerá una distancia mayor.

Sin embargo, las componentes vertical y horizontal del vector de sustentación no son independientes: un aumento de la primera implica una reducción de la segunda, y viceversa, por lo que toda maniobra para controlar el alcance longitudinal afecta también a la distancia transversal recorrida. Por esa razón, durante esta primera etapa se monitorizó el error en la componente transversal de la trayectoria. Si esta sobrepasaba un valor predeterminado, el sistema comandaba un viraje; es decir, un cambio en el signo del ángulo de balanceo. Para mantener el rumbo bajo control, la cápsula del MSL tuvo que realizar tres virajes, tal y como estaba previsto que sucediera.

Fue durante la primera etapa cuando la nave experimentó la mayor reducción de la velocidad y cuando alcanzó los valores térmicos y de desaceleración más elevados de todo el vuelo: unos 165 vatios por centímetro cuadrado y 12,6*g*, respectivamente. La etapa de control del alcance longitudinal termina cuando la nave adquiere una velocidad específica. Para la cápsula del MSL, esta se estableció en 1,1 km/s.

En la segunda etapa del guiado se procede al ajuste del rumbo. En ella no se ejerce ningún control sobre la componente vertical de la sustentación ni, por tanto, sobre la distancia longitudinal volada. Durante esta etapa, que en el caso del MSL duró 1 minuto y 44 segundos, solo se persigue reducir lo máximo posible el error final en la distancia transversal al punto de despliegue del paracaídas. El guiado del MSL lo logró comandando un ángulo de balanceo proporcional al error en el rumbo que, al mismo tiempo, no excediese un valor límite de seguridad, establecido en ±30 grados. Dicho umbral pretendía garantizar que la componente vertical de la sustentación se mantuviera en un valor elevado, a fin de que no se produjera una pérdida de altitud excesiva antes de desplegar el paracaídas. Tal y como estaba previsto, los valores del ángulo de balanceo comandados durante esta fase estuvieron siempre muy por debajo del límite de seguridad.

Cerca del final de la fase de entrada, 19 segundos antes del despliegue del paracaídas, el guiado se inhabilitó y se inició una maniobra de balanceo de 180 grados para enfocar hacia la superficie marciana el sensor de descenso terminal de a bordo. Al mismo tiempo, se ejecutó una maniobra de enderezamiento, llamada SUFR (por las siglas de *straighten-up and fly right*, «enderézate y vuela en línea recta»), en la que se eyectaron 6 lastres de 25 kilos para devolver el centro de masas al eje de simetría. Con ello se persigue que el ángulo de ataque se reduzca hasta un valor pequeño, una condición necesaria para evitar que se generen momentos de excesiva magnitud durante la apertura del paracaídas, lo que podría comprometer la estabilidad de la cápsula. El valor del ángulo de ataque en el momento del despliegue del paracaídas fue de 3,5 grados, uno menos de lo previsto y muy por debajo del valor límite aceptable, establecido en 12 grados. La fase de entrada atmosférica concluyó con la

apertura del paracaídas. A partir de ese momento dio inicio la fase de descenso, seguida de la de aterrizaje, las cuales ya no fueron guiadas.

LA ELIPSE DE ATERRIZAJE

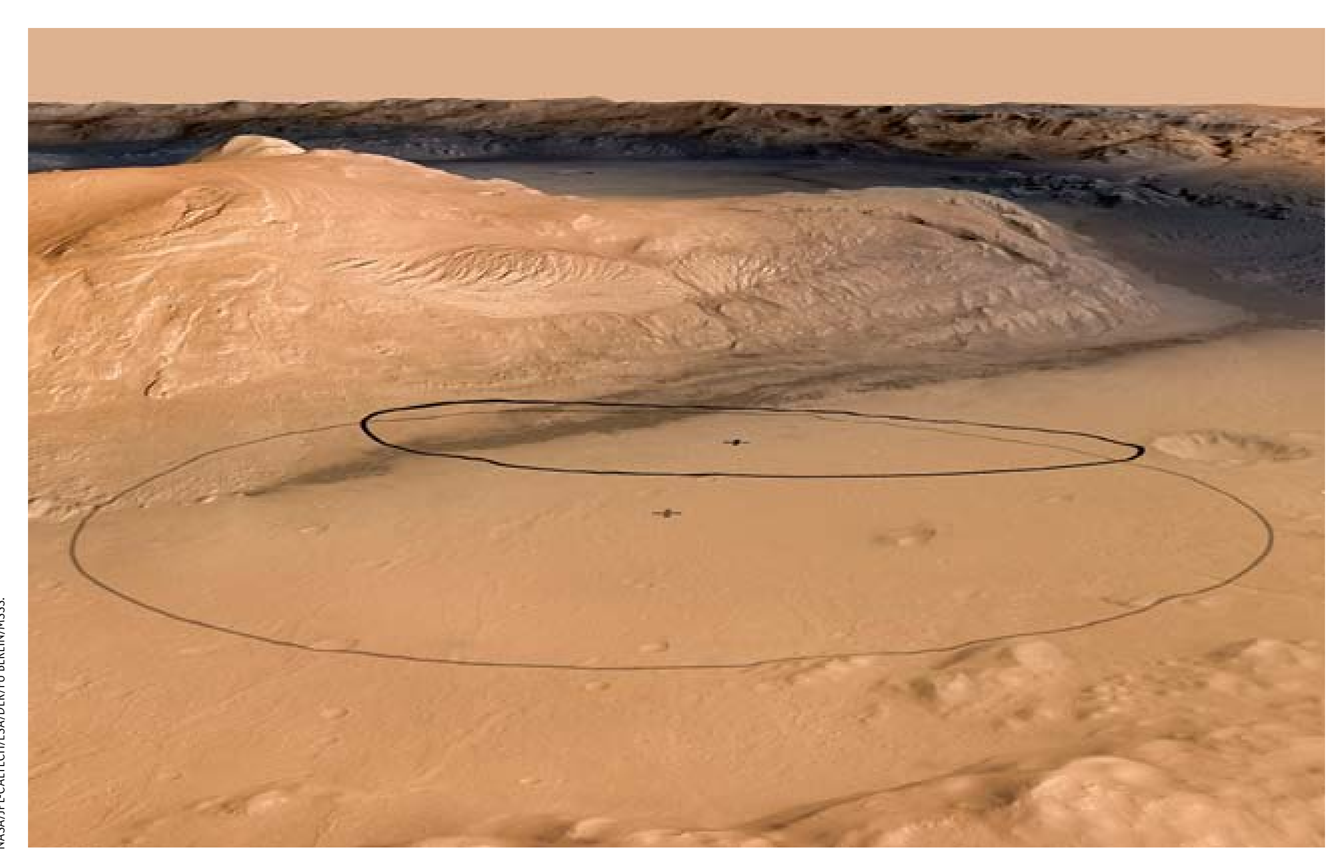
Aunque la nave tiene como meta aterrizar en un punto determinado, resulta imposible garantizar que dicho objetivo vaya a lograrse con absoluta precisión. Ello se debe a las inevitables desviaciones, o «dispersiones», de las condiciones reales de vuelo con respecto a aquellas consideradas más probables, o nominales. Como consecuencia, el lugar previsto de aterrizaje no es un punto, sino una región extensa con forma de elipse.

Las divergencias entre las condiciones reales y las nominales pueden deberse a varios factores. Por un lado, la densidad atmosférica y la velocidad del viento pueden diferir de los valores esperados. También puede ocurrir que la nave no llegue a la interfaz de entrada con la velocidad, posición o ángulo de trayectoria previstos; o incluso que algunas características físicas de la cápsula (como sus propiedades aerodinámicas o la posición del centro de masas, que determina el ángulo de ataque) disten ligeramente de las establecidas en el diseño y durante los estudios en tierra. Por último, existen desviaciones cuyos efectos la lógica de guiado no tiene opción de corregir: la navegación de a bordo, el sistema que le dice a la nave qué orientación tiene, dónde se encuentra y en qué sentido y a qué velocidad viaja, desempeña dicha función con un cierto error que no puede ser compensado por el guiado, ya que este no cuenta con otra alternativa que interpretar esa información como fidedigna.

Todas las posibles dispersiones de los valores nominales se dan dentro de unos intervalos que, o bien son conocidos, o que, en su defecto, se asignan con un alto grado de margen. En los análisis previos a la misión, las fases de entrada, descenso y aterrizaje se simulan no solo en condiciones nominales, sino también en presencia de todo tipo de desviaciones. Los recorridos resultantes reciben el nombre de trayectorias dispersadas, cada una de las cuales resulta en un punto de aterrizaje que se acercará más o menos al objetivo previsto.

En el caso del MSL, el análisis relativo al diseño de la fase atmosférica se realizó efectuando, junto a la simulación nominal, 8000 simulaciones dispersadas (se sabe que los resultados estadísticos alcanzados con una muestra semejante reproducen con buena aproximación los que arrojaría un mayor número de simulaciones). Al final, se obtiene una nube de puntos de aterrizaje que rellenan un área con forma de elipse. La probabilidad de que la nave acabe aterrizando en un lugar dado sigue una distribución aproximadamente normal, siendo mayor cuanto más cerca se encuentre dicho punto del centro de la elipse. Por convenio —ya que no resulta práctico planear una misión que cubra el 100 por cien de los casos dispersados—, el diseño se determina de acuerdo con la elipse de aterrizaje que contiene el 99,87 por ciento de los posibles lugares de aterrizaje, lo que equivale a tres desviaciones estándar (3 sigmas) en una distribución normal acumulada.

MEJORA FINAL: El requisito original del MSL era que la elipse de aterrizaje del *Curiosity* tuviese un tamaño de 25 × 20 kilómetros (*elipse mayor*). Sin embargo, varios análisis posteriores a noviembre de 2011 demostraron que la elipse podía reducirse hasta unos 19 × 6 kilómetros (*elipse menor*). Gracias a ello, el robot pudo aterrizar mucho más cerca del monte central del cráter de Gale, el objeto científico de la misión.



NASA/JPL-CALTECH/ESA/DLR/FU BERLIN/MSSS.

Para el vehículo explorador *Curiosity*, la elipse de aterrizaje fue de unos 19,3 km de largo (la dimensión del eje mayor) por 6,4 de ancho (el eje menor). Esa área resultó quince veces y media menor que la de su inmediata predecesora, la sonda *Phoenix*. De hecho, el lugar de aterrizaje seleccionado para el *Curiosity*, entre la parte exterior del cráter de Gale y su cima interior, habría supuesto un objetivo inalcanzable para las misiones marcianas anteriores, ya que sus elipses de aterrizaje habrían abarcado zonas exteriores al mismo cráter. Estos datos muestran con gran claridad las ventajas de llevar a cabo una entrada atmosférica guiada. Al final, el vehículo explorador aterrizó a tan solo 2,4 km del lugar previsto.

En relación con las dispersiones que hubo durante la entrada atmosférica, los análisis posteriores al vuelo del MSL mostraron que los sistemas de guiado, navegación y control funcionaron de manera altamente satisfactoria, e indicaron la existencia de dos perturbaciones interesantes a destacar, aunque inconsecuentes en última instancia. Por una parte, la densidad atmosférica que la cápsula encontró en las capas altas de la atmósfera resultó ser en torno a un 20 por ciento mayor de lo establecido nominalmente, lo que hizo que el primer ángulo de balanceo comandado por el guiado para compensar esta variación ambiental fuera 8,6 grados menor de lo previsto. También se vio que durante la segunda etapa del guiado hubo viento, principalmente de popa, que según algunas estimaciones pudo llegar a los 20 m/s y que pudo presentar también una pequeña componente lateral por babor. En esta etapa el guiado solo es capaz de corregir el rumbo, y no el alcance longitudinal, por lo que pudo contrarrestar únicamente el efecto de la componente por babor que afectaba al rumbo. Así, este viento de popa se constituyó como un factor externo a la nave que contribuyó al error final en el aterrizaje en su componente longitudinal. En cualquier caso, tanto el incremento de la densidad atmosférica como el viento de popa observados en el vuelo fueron parte de las perturbaciones que se incluyeron en las simulaciones dispersadas en los análisis de diseño previos a la misión, por lo que en ningún caso la acción combinada de estas perturbaciones conllevó que *Curiosity* acabara aterrizando fuera de la elipse de aterrizaje.

LECCIONES PARA EL FUTURO

En el futuro, las misiones robóticas con un diseño similar al del MSL podrán ver reducida aún más su elipse de aterrizaje. Para ello, bastarían un par de cambios que, aunque no se incluyeron en el MSL por cuestiones programáticas, no alterarían sustancialmente el diseño de la misión.

Una de las modificaciones tiene que ver con la precisión con que se conoce la orientación de la cápsula de entrada durante el tránsito atmosférico. Como apuntábamos más arriba, los errores en el sistema de navegación no pueden ser compensados por el guiado, por lo que contribuyen de manera significativa al tamaño de la elipse de aterrizaje. En el caso del MSL, el aspecto de la navegación que más contribuyó al tamaño de la elipse de aterrizaje fue el error en la inicialización de la orientación. A fin de estimar la posición, velocidad y orientación de la cápsula durante el vuelo atmosférico, se utilizó un instrumento de navegación denominado unidad de medida inercial (IMU, por sus siglas en inglés). La IMU necesita primero ser inicializada con ciertos valores. La posición y la velocidad se obtuvieron gracias al seguimiento radiométrico de la Red de Espacio Profundo de la NASA (una red internacional de radiotelescopios situados en EE.UU., Australia y España), mientras que la orientación se inicializó a partir de un sensor de estrellas montado en el módulo de servicio. Sin embargo, la IMU viajaba en la cápsula de entrada, por lo que tuvo que ser inicializada antes de que la cápsula y el módulo se separasen, unos diez minutos antes del comienzo del vuelo atmosférico. El hecho de que ambos instrumentos se encontrasen en partes separadas de la nave —y, por tanto, a cierta distancia uno del otro— aumentó la posible desviación en su alineamiento. Este error, sumado al que puede cometer el sensor de estrellas, se traslada a la inicialización de la IMU y, en consecuencia, a las estimaciones que esta hace de la orientación durante el vuelo. En el caso del MSL, el máximo error posible en la inicialización de la orientación fue de 0,25 grados; un valor pequeño pero, aun así, con gran influencia en el tamaño de la elipse de aterrizaje. Varios estudios han apuntado que la inclusión de un sensor de estrellas de bajo coste montado en la misma cápsula de entrada, cerca de la IMU, reduciría el máximo error posible a unos 0,06 grados, lo que disminuiría en unos 8 km la longitud del eje mayor de la elipse de aterrizaje.

Otro cambio que mejoraría la precisión en el aterrizaje guarda relación con el criterio elegido para abrir el paracaídas. En el MSL, este se basó en la velocidad de la nave: el paracaídas se desplegaría cuando la IMU de a bordo estimase una velocidad de 0,4 km/s. Sin embargo, diversos estudios han demostrado que un criterio basado en la distancia al objetivo, y no en la velocidad de la cápsula, resultaría en una reducción apreciable de la elipse de aterrizaje sin afectar por ello a los requisitos del despliegue. La acción combinada de estos dos cambios podría reducir entre tres y cuatro veces el área de la elipse de aterrizaje.

Con el primer vuelo atmosférico guiado en otro mundo, la exploración espacial dio un salto de gigante. La mejora en la precisión de los aterrizajes en el planeta rojo resultará trascendental no solo para futuras misiones robóticas similares al MSL, sino también para aquellas como la propuesta para traer a la Tierra muestras del suelo marciano o el posible envío al planeta vecino de un laboratorio astrobiológico. A largo plazo, la capacidad para aterrizar muy cerca del lugar requerido resultará crítica en las misiones tripuladas, ya que las cápsulas deberán posarse a decenas de metros de otras instalaciones y hábitats enviados con anterioridad. Sin duda, todas estas misiones futuras se verán beneficiadas por la experiencia del MSL.

PARA SABER MÁS

Mars exploration entry, descent, and landing challenges. Robert D. Braun y Robert M. Manning en *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 44, n.º 2, págs 310-323, marzo-abril de 2007.

Mars Science Laboratory entry guidance improvements study for the Mars 2018 mission. Eduardo García-Llama et al. en *IEEE Aerospace Conference 2012*, págs. 1-11, marzo de 2012.

Assessment of the Mars Science Laboratory entry, descent, and landing simulation. David W. Way, Jody L. Davis y Jeremy D. Shidner en *AAS/AIAA 23rd Space Flight Mechanics Meeting*, febrero de 2013.

Post-flight EDL entry guidance performance of the 2011 Mars Science Laboratory mission. Gavin F. Mendeck y Lynn Craig McGrew en *AAS/AIAA 23rd Space Flight Mechanics Meeting*, febrero de 2013.

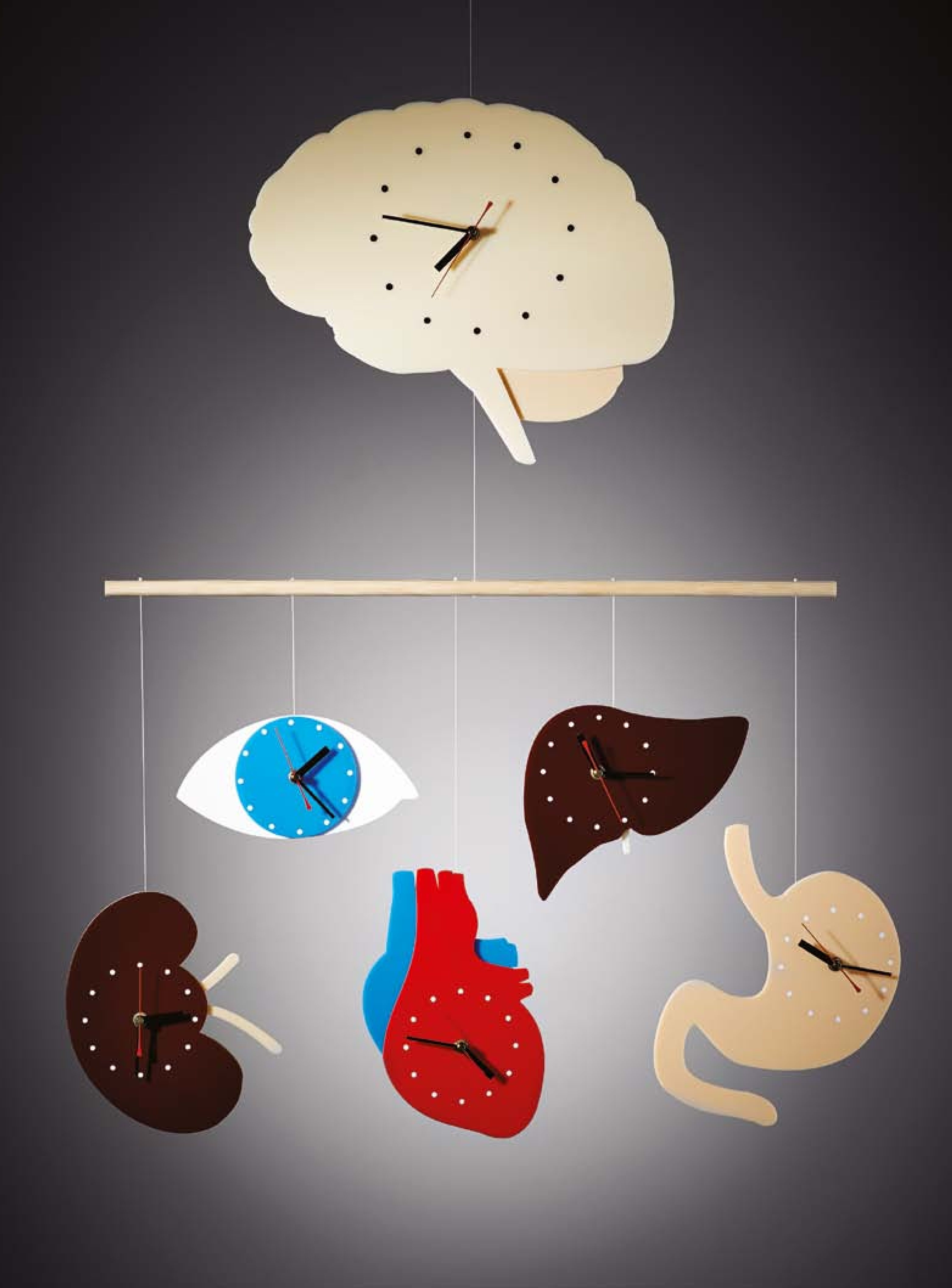
EN NUESTRO ARCHIVO

Otros desafíos en los viajes tripulados a Marte. Eduardo García Llama en *IyC*, diciembre de 2011.

Buscando vida en Marte. Peter H. Smith en *IyC*, enero de 2012.

Rumbo a Marte. Damon Landau y Nathan J. Strange en *IyC*, febrero de 2012.

Estudiando el planeta rojo. John P. Grotziger y Ashwin Vasavada en *IyC*, agosto de 2012.



CRONOBIOLOGÍA

NUESTROS RELOJES INTERNOS

Una serie de genes en el hígado, el páncreas y otros tejidos (y no solo en el cerebro) mantienen las distintas partes del organismo en sincronía. Los desajustes en este sistema pueden derivar en diabetes, depresión y otras enfermedades

Keith C. Summa y Fred W. Turek

MITCH PAYNE (*fotógrafo*); KYLE BEAN (*ilustración*)

Keith C. Summa, estudiante de doctorado en la Escuela Feinberg de Medicina de la Universidad Noroccidental, intenta averiguar cómo aplicar a la medicina clínica los descubrimientos científicos sobre los ritmos circadianos.

Fred W. Turek es neurobiólogo y director del Centro del Sueño y la Biología Circadiana en la Universidad Noroccidental. Es presidente fundador de la Sociedad para la Investigación de los Ritmos Biológicos.



Cualquiera que haya viajado en avión durante unas horas hacia el este o el oeste ha experimentado de primera mano lo que sucede cuando se produce un desajuste entre el reloj interno del organismo y la zona horaria a la que se ha desplazado. Puede tardarse hasta una semana en superar el *jet lag*, dependiendo de si el reloj central, situado en lo profundo del cerebro, necesita ser adelantado o atrasado para sincronizar el deseo de dormir del cuerpo y del cerebro con la oscuridad externa. Sin embargo, en los últimos años se ha descubierto, no sin sorpresa, que el organismo depende no solo del reloj cerebral, sino también de numerosos relojes locales que se sitúan en el hígado, el páncreas y otros órganos, además de en el tejido adiposo. Si cualquiera de ellos deja de estar sincronizado con el central, el desajuste puede favorecer el desarrollo de obesidad, diabetes, depresión u otras patologías complejas.

Ambos autores nos hemos dedicado a explorar en detalle cómo operan esos relojes periféricos y a identificar los genes que regulan su actividad. El primer gen de reloj biológico fue aislado, o clonado, a partir de moscas de la fruta en 1984. Uno de nosotros (Turek) formó parte del equipo que en 1997 clonó e identificó el primero de ellos en mamíferos. Se contabiliza ya por docenas el número de tales genes, descubiertos por investigadores de todo el mundo, que se han denominado *Clock* («reloj», en inglés), *Per* («período») o *Tim* (de *timeless*, «eterno»).

El trabajo de nuestro grupo se ha centrado en ratones, pero los genes circadianos se han descrito en un amplio abanico de organismos, como bacterias, moscas de la fruta y humanos. Muchos de ellos se asemejan entre sí en distintas especies (un indicio de que han determinado la supervivencia a lo largo de la evolución).

Hasta el momento, el mayor avance ha consistido en descifrar el papel de estos relojes en los trastornos del metabolismo, el conjunto de procesos mediante los cuales el organismo convierte los alimentos en energía que almacena para su uso posterior. (Uno de los hallazgos más sorprendentes ha sido comprobar que, en la ganancia de peso, tan importante parece ser lo que comemos como el momento del día en que lo hacemos.) Por supuesto, los ritmos circadianos no explican todos los aspectos de estas complejas patologías, pero ignorar los relojes del organismo va en detrimento nuestro. La comprensión de estos ritmos, que es cada vez mayor, podría cambiar por completo el diagnóstico y tratamiento de las enfermedades y ayudar a las personas a mantener la salud.

RELOJ CENTRAL

Desde los organismos más complejos hasta los más simples, toda la vida en la Tierra está gobernada por ritmos circadianos ajustados a un día de 24 horas. Se hallan presentes incluso entre las formas más antiguas de vida, las cianobacterias, unas algas unicelulares verdeazuladas que hoy en día ocupan diversos hábitats. Estos organismos obtienen su energía del sol a través de la fotosíntesis; utilizan la radiación solar para producir moléculas orgánicas y oxígeno a partir de dióxido de carbono y agua.

Un reloj interno hace que cada cianobacteria tenga preparada su maquinaria fotosintética antes del amanecer, lo que le permite empezar a captar energía tan pronto como la luz comienza a brillar y la coloca un paso por delante de otros organismos que se limitan a reaccionar ante la luz. De forma similar, gracias al reloj, la cianobacteria puede cesar la fotosíntesis cuando el sol se pone. De este modo evita desperdiciar energía y otros recursos en sistemas que no están activos durante la

EN SÍNTESIS

En lo profundo de nuestro cerebro se ubica un reloj central que coordina en el tiempo los procesos biológicos que se dan en el organismo.

En los últimos años se ha demostrado que existen relojes celulares (o locales) también en el hígado, el páncreas y otras partes del cuerpo.

Comer o dormir a deshora de manera sistemática puede desincronizar estos relojes periféricos respecto del reloj central en el cerebro.

Cada vez más datos indican que estos desajustes cronobiológicos predisponen a las personas a padecer obesidad, diabetes, depresión y otras enfermedades. Resincronizar los múltiples relojes del organismo puede que ayude a restaurar la salud y las funciones normales.

noche. Tales recursos se destinan, en su lugar, a reacciones que se realizan mejor en condiciones de oscuridad, como la replicación y reparación del ADN, que pueden verse alteradas por la radiación ionizante de los rayos solares.

Ciertas cepas de bacterias portadoras de mutaciones en diferentes genes de reloj pueden modificar el ciclo habitual de 24 horas para activar o desactivar genes en períodos de 20, 22 o incluso 30 horas. En una serie de estudios que agrupaban las células de acuerdo con sus ciclos alterados, Carl Johnson y sus colaboradores, de la Universidad Vanderbilt, demostraron en 1998 que las cianobacterias con un reloj biológico ajustado al ciclo de luz ambiental aventajaban a aquellas que lo presentaban desajustado. Por ejemplo, en un ciclo de luz-oscuridad de 24 horas, los microorganismos normales crecían más rápido y se dividían con más éxito que los mutantes con un ciclo de 22 horas. Pero cuando el equipo de Johnson fijó de modo artificial el ciclo de luz-oscuridad en 22 horas, los mutantes sobrevivieron mejor que los normales. Estos experimentos dejaron claro por primera vez que la capacidad de coordinar los ritmos metabólicos internos con los ciclos ambientales aumentaba la eficacia biológica.

Aunque los mecanismos cronobiológicos humanos dependen de genes distintos de los que presentan las cianobacterias, nuestra maquinaria circadiana comparte muchas otras similitudes con la de ellas, lo que hace pensar que ambos procesos aparecieron de forma independiente durante la evolución para adaptarse a las mismas necesidades y funciones biológicas.

RELOJES PERIFÉRICOS

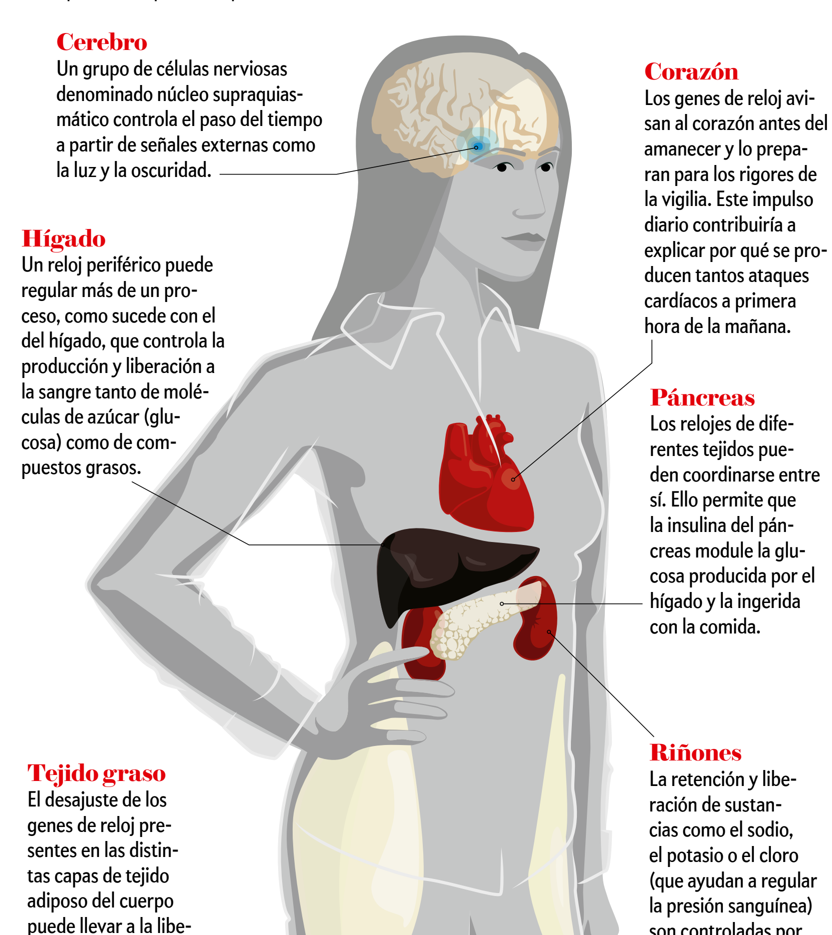
Al principio se suponía que existía un único reloj que funcionaba como un metrónomo y regulaba multitud de procesos biológicos en el organismo. En los años setenta del siglo xx se localizó este supuesto reloj en el núcleo supraquiasmático del cerebro, justo por encima de donde se cruzan los nervios ópticos. Pero hace unos 15 años surgieron indicios de que había mecanismos temporales secundarios en otros órganos y tejidos, así como en células individuales. Comenzaron a hallarse pruebas de que los mismos genes de reloj que intervenían en el cerebro se activaban y desactivaban periódicamente en células del hígado, los riñones, el páncreas, el corazón y otros tejidos. Ahora sabemos que estos relojes celulares regulan la actividad de entre un 3 y un 10 por ciento —y en algunos casos tal vez hasta de un 50 por ciento— de los genes en varios tejidos.

Hacia el mismo tiempo, una serie de científicos comenzaron a preguntarse si los ritmos circadianos influían en los procesos de envejecimiento. Turek propuso a Amy Easton, entonces estudiante de posgrado en la Universidad Noroccidental, llevar a cabo una serie de experimentos en ratones con una mutación en el gen *Clock*. Mientras examinaba las pautas diarias de carrera en los individuos viejos, se dio cuenta de que tendían a estar obesos y les costaba subir a las ruedas giratorias de sus jaulas. Esta observación nos llevó a centrar parte de nuestra labor en el metabolismo y los ritmos circadianos. En una serie de experimentos publicados en *Science* en 2005, demostramos la relación entre anomalías en el gen *Clock* y el desarrollo de obesidad y síndrome metabólico (un conjunto de trastornos fisiológicos que aumentan el riesgo de sufrir cardiopatías y diabetes). Para recibir el diagnóstico de síndrome metabólico, una persona debe manifestar al menos tres de entre las siguientes alteraciones: exceso de grasa en la región abdominal, en lugar de en las caderas; alta concentración de triglicéridos (un tipo de lípido) en sangre; bajos niveles de HDL (el llamado «colesterol bueno»); hipertensión arterial; valores elevados de glucosa (lo que indica un mal procesamiento del azúcar).

ASÍ FUNCIONA

Los múltiples relojes del organismo

La vida en la Tierra sigue un ritmo diario de 24 horas. En los humanos, un reloj central en el cerebro sincroniza otros relojes subordinados en varias células del organismo. En concreto, ciertos genes regulan la síntesis de proteínas en diferentes momentos del día, lo que estimula o inhibe otros procesos biológicos. Si estos relojes se desincronizan, pueden aparecer problemas de salud.



JOSY CONKLIN

Ese trabajo hizo crecer el interés por los efectos de los ritmos circadianos sobre el metabolismo. Estudios anteriores con trabajadores por turnos —que experimentan un desajuste crónico entre sus relojes internos y el día solar— habían demostrado que estas personas presentan un mayor riesgo de padecer enfermedades metabólicas, cardiovasculares o gastrointestinales, entre otras. Pero también suelen exhibir otras conductas poco saludables, como dormir poco, seguir una dieta pobre y llevar una vida sedentaria. Por consiguiente, no resultaba fácil distinguir en ellas entre causa y efecto. Los ratones con el gen *Clock* mutado, al brindar una prueba genética que relacionaba el reloj interno y la salud metabólica, facilitaron el estudio más preciso, a escala molecular, de los ritmos circadianos, lo que permitió extraer conclusiones más definitivas.

RELOJES Y METABOLISMO

Poco después de descubrirse que los ritmos circadianos ayudaban a regular el metabolismo, se empezó a estudiar el reloj periférico situado en el hígado, un órgano que ejerce una función esencial en el metabolismo. En 2008, Katja Lamia, Kai-Florian Storch y Charles Weitz, todos por entonces en la Escuela de Medicina de Harvard, llevaron a cabo un experimento con ratones en los que se había eliminado un gen circadiano fundamental solo en las células hepáticas. (Al contrario que los humanos, los ratones están activos principalmente durante la noche y duermen durante el día, aunque el ciclo sueño-vigilia está regulado de forma similar.) Los animales carecían de reloj en el hígado, pero conservaban los del resto del organismo. Durante el período de descanso diurno (en el que los ratones no comen demasiado), exhibían episodios prolongados de hipoglucemia (valores bajos de azúcar en sangre). Esta bajada resulta peligrosa, porque el cerebro puede comenzar a fallar en minutos si no recibe suficiente glucosa para satisfacer sus necesidades energéticas.

Experimentos posteriores demostraron que la hipoglucemia se producía porque habían desaparecido los ritmos que suelen determinar cuándo el hígado produce y segrega la molécula de azúcar hacia la sangre. Por tanto, el reloj de este órgano contribuye a mantener niveles normales de glucosa en sangre a lo largo del día, con lo que se asegura un suministro constante y adecuado de energía al cerebro y al resto del organismo.

No es sorprendente que se necesite un sistema opuesto que limite el exceso de glucosa en sangre en respuesta a la ingesta. La principal hormona responsable de este proceso es la insulina, producida por las células beta del páncreas. Después de ingerir un alimento, el azúcar entra en el flujo sanguíneo y desencadena la liberación de insulina. Esta hormona, por su parte, actúa como un freno al aumento de glucosa en la sangre, al promover su retirada de la circulación y su almacenamiento en los músculos, el hígado y otros tejidos.

En una serie de experimentos posteriores, Billie Marcheva y Joseph T. Bass (uno de los miembros iniciales, junto con Turek, del equipo que investigó el metabolismo circadiano en la Noroccidental) determinaron el papel del reloj biológico en el páncreas. Descubrieron que tal reloj resulta esencial para mantener los niveles normales de azúcar en sangre y que su alteración provoca una grave deficiencia en la función pancreática, la cual da lugar a diabetes. En esta enfermedad metabólica, el organismo no produce suficiente insulina o es insensible a ella. Como consecuencia, un exceso de azúcar va a parar al torrente sanguíneo, mientras que las células se quedan sin él.

Marcheva y Bass comenzaron por examinar tejido pancreático de ratones que presentaban mutaciones en los genes del reloj circadiano. Observaron que la cantidad de insulina segregada en respuesta a la estimulación con glucosa disminuía drásticamente. A continuación, generaron ratones en los que se había eliminado el reloj solo en el páncreas. Los animales desarrollaron diabetes de forma temprana y exhibieron una fuerte reducción de la secreción de insulina.

El conocimiento creciente de los ritmos circadianos podría cambiar por completo el diagnóstico y tratamiento de las enfermedades en el futuro

Esos ejemplos ilustran un punto fundamental sobre los relojes, a saber, que pueden ejercer funciones totalmente distintas en un tejido u otro. En casos como los del hígado y el páncreas, incluso regulan procesos fisiológicos opuestos. No obstante, cuando están integrados en un sistema común, los relojes se sincronizan de forma precisa para mantener la homeostasis del organismo, que consiste en conservar estables los niveles de moléculas esenciales a pesar de que haya cambios en las condiciones ambientales.

NUMEROSAS FUNCIONES

Otro descubrimiento fundamental es que el reloj de un tejido determinado puede afectar a más de un proceso en dicho tejido. De este modo, un mismo reloj puede regular múltiples procesos. El del hígado, por ejemplo, controla redes enteras de genes necesarios para la producción y metabolización de la glucosa. Además, en 2011, Mitch Lazar, de la Universidad de Pensilvania, y sus colaboradores demostraron que tal reloj determinaba también la cantidad de grasa que se acumulaba en las células hepáticas.

En esa ocasión, el equipo de Lazar comprobó que un gen de reloj denominado *Rev-erbα* actuaba como un temporizador para una enzima que controla el acceso a las instrucciones genéticas situadas dentro de la molécula de ADN. La enzima en cuestión, la histona desacetilasa 3 (HDAC3), regula el proceso por el que ciertas cadenas de ADN se hallan tan estrechamente enrolladas que la información hereditaria que contienen no puede ser utilizada por la célula para llevar a cabo sus funciones.

Lazar demostró que, al inhibir el gen *Rev-erbα* (lo que a su vez impedía la actividad de HDAC3), aparecía una enfermedad conocida como esteatosis hepática, o hígado graso. Resulta que una de las funciones de HDAC3 consiste en desactivar los genes que controlan la producción de moléculas grasas durante la noche (cuando los ratones están activos y necesitan utilizar sus reservas energéticas). La supresión del gen de reloj hacía disminuir la cantidad de HDAC3, lo que mantenía activados los genes responsables de la síntesis de grasas en el hígado. Esta hiperactividad provocaba una acumulación anómala de grasa (adiposis) en las células hepáticas, un proceso que altera la función del órgano y suele presentarse en la obesidad y la diabetes.

Los genes de reloj también se ubican en el tejido adiposo, desde donde intervienen en numerosas reacciones metabólicas. Además de servir como una reserva de energía, este tejido fun-

ciona como un órgano endocrino; al segregar hormonas hacia la sangre, como la leptina, altera la actividad de otros órganos. Georgios Paschos, Garret FitzGerald, ambos por entonces en la Universidad de Pensilvania, y sus colaboradores crearon hace poco unos ratones que carecían de reloj en las células grasas (adipocitos) y observaron que los animales desarrollaban obesidad y desplazaban sus patrones de ingesta habituales al período diurno. Como consecuencia, las moléculas grasas fluían por su organismo «a destiempo», lo que trastocaba la capacidad de su cerebro de regular el ritmo y el volumen de las comidas. Este cambio en los hábitos alimentarios parece afectar de modo específico a los animales que no presentan el reloj en los adipocitos, porque los que carecen del reloj pancreático o hepático mantienen los ritmos de alimentación normales.

El descubrimiento de que los múridos modifican sus pautas de ingesta y engordan al faltarles el reloj de los adipocitos resulta coherente con estudios anteriores que han demostrado que la distribución temporal de las comidas puede influir de modo notable en la eficacia con la que el organismo almacena y utiliza la energía que consume. En este sentido, en 2009, Deanna Arble, por entonces estudiante de posgrado en nuestro equipo de la Noroccidental, demostró que los ratones a los que solo se ofrecía una dieta hipercalórica durante las horas «inadecuadas» del día engordaban más que los alimentados con la misma dieta durante el período de oscuridad. Estas diferencias persistieron a pesar de que en ambos grupos el consumo global de calorías y la cantidad de ejercicio físico eran similares.

Más recientemente, Satchidananda Panda y su grupo del Instituto Salk de Estudios Biológicos en La Jolla, California, han reforzado esos hallazgos al demostrar que si restringían el suministro de los alimentos hipercalóricos a una franja de 8 horas durante el período normal de alimentación (fase oscura), se evitaba la obesidad o la disfunción metabólica en los ratones. De hecho, estos animales presentaban perfiles metabólicos parecidos a los que seguían una dieta baja en calorías. El beneficio parece derivarse de una mejor coordinación de los ciclos metabólicos en el hígado y otros tejidos.

Curiosamente, esos experimentos con múridos pueden resultar relevantes para las personas que sufren el síndrome de ingesta nocturna, un trastorno que los lleva a consumir un exceso de calorías durante la noche y a padecer obesidad y síndrome metabólico. Este trastorno quizá se deba en parte a un fallo en la regulación de los ritmos circadianos del hambre, una asincronía que puede predisponer a la ganancia de peso y al descontrol de los procesos metabólicos.

En un estudio reciente con personas que seguían una dieta, Marta Garaulet, de la Universidad de Murcia, y Frank Scheer, de Harvard, hallaron una asociación entre el momento del almuerzo y el éxito en la pérdida de peso. Con la misma dieta, las personas que comían más temprano tendieron a adelgazar más que las que lo hacían más tarde. Se necesitan más ensayos clínicos para comprobar si el momento de las comidas influye en el desarrollo de obesidad, diabetes y otras dolencias relacionadas, pero estos resultados hacen prever que las estrategias alimentarias que tengan en cuenta los ritmos circadianos se convertirán algún día en un complemento nuevo, no farmacológico, de los regímenes estándar.

MEDICINA CIRCADIANA

Otros trabajos sugieren que la investigación detallada de la cronobiología de las personas podría contribuir a una mayor comprensión de los trastornos metabólicos y permitiría aplicar tratamientos más apropiados. Por ejemplo, Till Roenneberg y sus colaboradores de la Universidad de Múnich han estudiado los patrones de sueño de miles de personas en todo el mundo y han descrito una forma común de desajuste circadiano crónico a la que se refieren como *jet lag* social. Al representar la diferencia temporal entre el ciclo habitual de sueño durante la semana laboral (o escolar) y el de los fines de semana de ocio, han cuantificado la alteración semanal del reloj interno. Para alguien que se levanta a las 6 a.m. durante la semana y duerme hasta las 9 o las 10 a.m. los fines de semana, tal desajuste puede equipararse a atravesar de tres a cuatro zonas horarias dos veces por semana. Los investigadores han descubierto una asociación positiva entre la magnitud del *jet lag* social y el índice de masa corporal, lo que sugiere que la alteración de los ciclos circadianos contribuye a la ganancia de peso.

Además de haber ahondado en el conocimiento de los mecanismos que explican la conexión entre los genes de reloj y los trastornos del metabolismo, hace poco se han presentado datos provocadores sobre la relación que existe entre los ritmos circadianos y muchas otras patologías. Se han descubierto así nexos entre la alteración de los ritmos y enfermedades del corazón o del sistema digestivo, así como varios tipos de cáncer, trastornos neurológicos y neurodegenerativos y ciertas enfermedades psiquiátricas. En este sentido, una serie de estudios pequeños sugieren que, en algunos casos, los desórdenes en el ciclo del sueño pueden ser un factor causal —y no solo un efecto— de la depresión grave en personas que ya presentan una predisposición a esta enfermedad. De forma similar, experimentos con ratones y hámsteres realizados en los últimos cinco años han demostrado que la simulación del estado de *jet lag* dificulta el aprendizaje y la memoria y provoca anomalías en algunas estructuras del cerebro.

Una comprensión más profunda del papel que desempeñan los relojes internos en nuestro organismo tiene el potencial de revolucionar la medicina. Conocer el funcionamiento óptimo de los relojes (como saber cuándo se activa y desactiva la producción de glucosa en el curso de 24 horas) podría llevar al desarrollo de lo que llamamos «medicina circadiana». Creemos que los médicos que sepan incorporar información sobre los ritmos circadianos y los ciclos de sueño-vigilia para establecer el diagnóstico y el tratamiento de las enfermedades tendrán mayores posibilidades de mejorar la salud, prevenir dolencias y optimizar las terapias que sus pacientes requieren.

PARA SABER MÁS

Your guide to healthy sleep. Revisado por el Instituto Nacional del Corazón, los Pulmones y la Sangre. Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU., agosto de 2011. **www.nhlbi.nih.gov/files/docs/public/sleep/healthy_sleep.pdf**

Tick tock: New clues about biological clocks and health. Emily Carlson et al. en *Inside Life Science*. Instituto Nacional de Ciencias Médicas Generales. Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU. Publicado en línea el 1 de noviembre de 2012.

Chronobiology and obesity: Interactions between circadian rhythms and energy regulation. Keith C. Summa y Fred W. Turek en *Advances in Nutrition*, vol. 5, n.º 3, págs. 312S-319S, mayo de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La cadencia del reloj biológico. Michael W. Young en *IyC*, mayo de 2000.

El tiempo biológico. Karen Wright en *IyC*, noviembre de 2002.

La iluminación artificial desajusta nuestro reloj biológico. Juan Antonio Madrid Pérez en *IyC*, septiembre de 2015.



EVOLUCIÓN

DEL LOBO

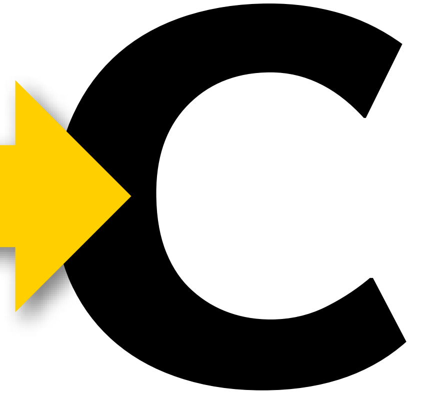
Cómo un carnívoro temible acabó convirtiéndose en el mejor amigo del hombre

Virginia Morell


AL PERRO

Virginia Morell, redactora científica, escribe sobre evolución y etología para *Science* y *National Geographic*, entre otras publicaciones. Su último título publicado es *Animal wise* (Crown, 2013).





CUANDO ALGUIEN HA CUIDADO CACHORROS DE LOBO Y DE PERRO DE APENAS una semana de vida y los ha amamantado con biberón día y noche, sabe apreciar sus diferencias. Zsófia Virányi, etóloga del Centro de Estudios sobre el Lobo, en Austria, y sus colaboradores crían desde 2008 ejemplares de ambas especies con el fin de descubrir lo que convierte a cada una en lo que son, perros y lobos. El centro alberga actualmente cuatro manadas de lobos y otras tantas de canes, integradas por entre dos y seis individuos. Todos han sido adiestrados para obedecer órdenes básicas, caminar con correa y tocar con el hocico la pantalla de un monitor para ejecutar test de cognición. Pero, pese a haber convivido y trabajado con ellos siete años, los lobos siguen conservando ese libre albedrío que tan poco tiene de canino.

Si dejamos un pedazo de carne sobre la mesa y gritamos a uno de los perros «¡No!», este obedecerá. Al contrario del lobo, que nos mirará a los ojos y tomará el bocado. Es una certeza desconcertante que Virányi ha experimentado en repetidas ocasiones. Y cada vez que eso sucede se vuelve a preguntar cómo pudo el lobo convertirse en un animal doméstico.

«No se puede convivir con un carnívoro de talla respetable que se comporte de esa guisa. Uno quiere un animal como el perro, que acate el "no".»

Tal vez el hecho de entender una orden tajante guarde relación con la jerarquía que impera en las jaurías caninas, que, lejos de igualitarias como las del lobo, son dictatoriales, tal y como han descubierto Virányi y sus colaboradores. Los lobos comen juntos y, aunque el individuo dominante gruña y enseñe los dientes a uno de los subordinados, este no marcha. No ocurre lo mismo con los perros. Los subordinados raramente comen con el dominante. Ni siquiera lo intentan. Las investigaciones del grupo también apuntan a que, en vez de esperar a cooperar en tareas con los humanos, los perros esperan que se les ordene lo que han de hacer.

Virányi se pregunta con perplejidad cómo el igualitario e independiente lobo se tornó en el obediente y servicial perro y qué papel tuvo el hombre primitivo en tal proeza: «Intento concebir cómo se produjo la transformación y no puedo».

No es la única. A pesar de haber determinado con éxito el momento, el lugar y el ascendente de casi todos los animales domesticados, de la oveja a la vaca y del pollo a la cobaya, los especialistas no se ponen de acuerdo en lo referente a nuestro mejor amigo, *Canis familiaris*. También conocen los motivos que impulsaron a criar y seleccionar los otros animales domésticos (disponer de una despensa a mano), pero ignoran qué empujó a acoger un depredador en el hogar. Además, el perro es la primera especie domesticada, una condición que acrecienta el misterio sobre su origen.

Pese a lo inescrutable del misterio, los expertos están comenzando a descifrarlo. En los últimos años se han sucedido diversos avances decisivos y hoy es posible afirmar que, en contra de la creencia general, los perros no son descendientes del lobo que habita en gran parte del hemisferio norte, desde Alaska hasta Siberia y hasta Arabia Saudita, sino de otro lobo desconocido y extinto. Tampoco hay duda de que el proceso de domesticación tuvo lugar antes del nacimiento de la agricultura, como algunos han propuesto, mientras la especie humana se dedicaba a la caza y la recolección.

En qué momento y lugar el lobo se convirtió en perro y si este hecho se produjo una sola vez son incógnitas a las que un gran equipo de investigación integrado por antiguos rivales científicos intenta dar respuesta. Los investigadores visitan museos, universidades y otras instituciones de todo el mundo para estudiar colecciones de fósiles y huesos caninos, al tiempo que preparan muestras genéticas de lobos y perros antiguos y modernos para llevar a cabo el cotejo más exhaustivo hasta la fecha. Cuando todo concluya, estarán muy cerca de saber cuándo y dónde —si no exactamente cómo— el lobo emprendió el camino que lo acabó convirtiendo en nuestro fiel compañero. Las respuestas a estas preguntas complementarán el creciente caudal de datos

EN SÍNTESIS

El perro es el primer animal domesticado. A pesar de años de estudio, todavía no conocemos de qué modo surgió, ni en qué momento ni lugar.

Los recientes análisis de ADN han arrojado nueva luz sobre el antepasado del perro y un ambicioso proyecto está en marcha para concretar el momento y el lugar de la domesticación canina.

Los nuevos conocimientos aportarán pistas sobre el curso de la relación entre el hombre y el perro en los milenios posteriores a su domesticación.

FOTOGRAFÍAS DE PETER RIGAUD

que indica que el hombre y el perro se influyeron mutuamente una vez iniciada su relación.

DATOS CONTRADICTORIOS

Cuando los primeros humanos modernos llegaron a Europa hace unos 45.000 años, hallaron el lobo común y otros tipos de lobo, entre ellos el megafáunico, que cazaba grandes herbívoros como el mamut. En esa época el lobo ya había demostrado ser una de las especies mejor adaptadas y fructíferas de la familia de los cánidos, presente en toda Eurasia hasta Japón, Oriente Próximo y Norteamérica. Lejos de permanecer confinado en un solo hábitat, medraba en la tundra, la estepa, el desierto, los bosques, las zonas costeras y las grandes altitudes de la meseta tibetana. Y compitió con los recién llegados por las mismas presas: mamuts, ciervos, uros, rinocerontes lanudos, antílopes y caballos. A pesar de esta competición, un tipo de lobo, tal vez descendiente del lobo megafáunico, comenzó a vivir cerca de los humanos. Basándose en los datos de pequeños fragmentos del genoma, los expertos pensaron durante años que esta especie correspondía al lobo moderno (*Canis lupus*) y que este cánido era el único ancestro del perro.

Pero en enero de 2014 un equipo de genetistas descubrió que esa idea arraigada resultaba errónea. El cruzamiento reiterado entre el lobo y el perro, que comparten el 99,9 por ciento del ADN, ha generado datos engañosos en los estudios precedentes. Ese escarceo perdura hoy: los lobos de pelaje negro han recibido el gen de ese color de un perro, y los perros pastores del Cáucaso, en Georgia, se aparean tan a menudo con lobos autóctonos que ambas poblaciones cuentan con ancestros híbridos; entre el 2 y el 3 por ciento de los individuos estudiados son híbridos de primera generación. (Abundando en el tema del mestizaje, en junio de 2014 se publicó en *Current Biology* la secuenciación de ADN de un fósil de lobo de 35.000 años de antigüedad descubierto en Siberia. Esta especie parece haber aportado ADN a las razas nórdicas, como el husky, debido a la hibridación en tiempos remotos.)

Según las conclusiones del estudio de enero de 2014, en el que se analizó íntegramente el genoma del perro y del lobo actual, nuestros fieles compañeros no descienden del lobo moderno. Ambas especies son taxones hermanos y se originaron a partir de un ancestro desconocido que se ha extinguido. «La idea de que el lobo de hoy ya vagaba hace cientos de miles de años y de que el perro derivó de él se hallaba tan arraigada que nos sorprendió mucho comprobar que era falsa», confiesa Robert Wayne, genetista evolutivo de la Universidad de California en Los Ángeles. Él mismo dirigió en su día los primeros estudios genéticos que proponían ese parentesco directo entre ambas especies y ha sido uno de los 30 autores del novedoso estudio, publicado en *PLOS Genetics*, que ha echado por tierra esa noción.



SIÉNTATE Y ESPERA: Un perro del Centro de Investigación del Lobo, en las afueras de Viena, aguarda el permiso para comer. Los lobos no muestran ese respeto por la autoridad humana, ni siquiera los criados en cautividad.

Tal vez los esfuerzos renovados por concretar el momento y el lugar de la domesticación del perro deparen más sorpresas. Y es que los estudios anteriores dejaron un rastro de confusión. El primero de ellos, emprendido en 1997, se centró en las diferencias genéticas entre el lobo y el perro y llegó a la conclusión de que este podría haber sido domesticado hace unos 135.000 años. Otro trabajo posterior realizado por algunos miembros del mismo grupo señaló el Oriente Próximo como su cuna. Pero un tercer análisis publicado en 2009, que examinó el ADN de 1500 perros modernos, argumentaba que fueron domesticados por primera vez en el sur de China hace menos de 16.300 años. Entonces, en 2013, un equipo de investigación comparó el genoma mitocondrial de antiguos perros y lobos de Europa y Norteamérica con el de congéneres modernos y llegó a la conclusión de que el perro nació en Europa hace entre 32.000 y 19.000 años.

El biólogo evolutivo Greger Larson, de la Universidad de Oxford, uno de los directores del gran proyecto sobre la domesticación del perro, asegura que, pese a su importancia, los estudios anteriores adolecen de algunos defectos. Critica los de 1997 y 2009 por analizar exclusivamente el ADN de perros actuales y el último por el escaso alcance geográfico de las muestras. «No se puede resolver la incógnita solo con animales modernos, como si representaran ventanas al pasado», asegura. A su juicio, los estudios de ADN del perro actual no aportan información suficiente porque las poblaciones humanas han migrado y han cruzado entre sí perros de todo el mundo en diversas ocasiones, lo que ha difuminado su ascendencia. Cualquier seña de identidad regional que pudiera haber servido para trazar su origen se ha perdido hace tiempo.

Para enturbiar aún más el asunto, el lobo presenta una distribución amplísima, explica Larson. En contraste, recuerda que los ancestros de la mayoría de las demás especies domesticadas, como la oveja y el pollo, tienen una distribución geográfica mucho menor, lo cual facilita el estudio sobre su origen.

Larson sospecha que varias poblaciones geográficamente dispersas de una especie ancestral de lobo podrían haber contribuido a la génesis del perro actual. No sería la primera vez que algo así sucede. El experto ha demostrado que los cerdos fueron domesticados en dos ocasiones, una en Oriente Próximo y otra en Europa. Curiosamente, los enigmáticos fósiles de entre 33.000 y 36.000 años de antigüedad hallados en Bélgica, la República Checa y el suroeste de Siberia, que exhiben una mezcla de rasgos caninos y lobunos, apuntan a la posibilidad de al menos tres intentos de domesticación de un lobo ancestral. Pero los rasgos anatómicos de estos fósiles por sí solos no permiten averiguar el origen del perro.

Para resolver el rompecabezas de la domesticación canina, Larson y sus colaboradores están recurriendo a dos estrategias

que emplearon en el estudio del cerdo. La primera consiste en el análisis metódico de miles de muestras antiguas y modernas de ADN de perro y de lobo procedentes de especímenes de todo el planeta. La segunda, la morfometría geométrica, es una técnica novedosa que permite cuantificar ciertos rasgos anatómicos, como las curvaturas del cráneo, y comparar mejor la osamenta de los individuos. Anteriormente se confiaba sobre todo en la longitud del hocico y en el tamaño de los dientes caninos para distinguir el perro del lobo. El primero es, por lo general, más chato y presenta caninos más pequeños y piezas dentales más juntas que las del lobo. El nuevo método tal vez descubra otras diferencias, más reveladoras. Sumadas, ambas técnicas deberían ofrecer el retrato más detallado de la domesticación del perro hasta la fecha.

ENCUENTROS CERCANOS

A pesar de que todavía se desconocen el momento y el lugar de la domesticación del perro, hoy se tiene una idea general del tipo de sociedad humana que trabó lazos con él. Tal cuestión ha suscitado también debate desde hace años. Hay quien sostiene que las comunidades sedentarias de agricultores dieron ese paso. Al fin y al cabo, los demás animales domésticos no quedaron sometidos a los humanos hasta que estos no comenzaron a cultivar la tierra y a echar raíces en un lugar. Otros, en cambio, atribuyen el mérito a los cazadores-recolectores que los precedieron. Wayne aclara que por lo menos el último estudio de ADN de su equipo ha zanjado esa parte del debate. «La domesticación del perro precedió a la agricultura. Tuvo lugar cuando la humanidad obtenía su sustento de la caza y la recolección», en algún momento hace entre 18.000 y 32.000 años. (Se cree que la agricultura floreció hace unos 12.000 años en Oriente Próximo.)

Y ese dato nos lleva de nuevo a las preguntas que Virányi y casi todos los amantes de los perros se plantean: ¿Cómo lo consiguieron aquellos cazadores-recolectores? ¿O acaso no fue cosa suya? ¿Y si los primeros perros (que, recordémoslo, primero habrían sido más lobos que perros) surgieron de forma espontánea?

El origen del género *Canis* se remonta a unos siete millones de años, y aunque algunos de sus miembros, como el chacal y el lobo abisinio, habitaban en África, la cuna de la humanidad, no hay pruebas de que los primeros humanos intentaran domesticarlos. La tríada lobo-perro-hombre solo comenzó a forjarse una vez que los humanos modernos migraron fuera de África y colonizaron Europa hace 45.000 años.

Los registros fósil y arqueológico aportan pistas sobre la relación cambiante entre los cánidos y los primeros hombres modernos. Tomemos los restos de estos animales desenterrados entre 1894 y 1930 en Predmostí, un enclave de unos 27.000 años de antigüedad en el valle del río Becva, en la actual República Checa. Los antiguos pobladores que vivieron y murieron allí reciben el nombre de gravetienses por un yacimiento con artefactos culturales similares hallados en La Gravette, Francia. Los gravetienses checos eran cazadores de mamuts; solo en este lugar se han hallado más de un millar. Devoraban su carne, enterraban los restos humanos con sus omóplatos y decoraban sus colmillos con grabados.

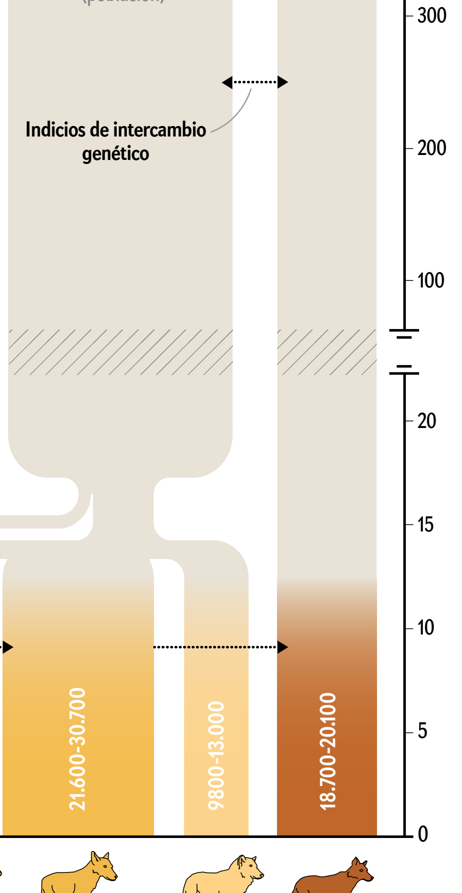
HALLAZGOS



Una historia compleja

A fin de reconstruir la evolución del perro, Robert Wayne, de la Universidad de California en Los Ángeles, y sus colaboradores secuenciaron el genoma de dos razas caninas primitivas (el basenji y el dingo), de tres variedades regionales del lobo y del chacal, otro miembro de la familia de los cánidos. Compararon estos genomas con el del bóxer, una raza canina moderna. Durante tiempo se ha pensado que el lobo actual era el antepasado del perro.

Un análisis publicado en enero de 2014 en *PLOS Genetics* refuta esa hipótesis y apunta a que un tipo extinto de lobo dio origen al perro antes del inicio de la revolución agrícola, hace 12.000 años. El estudio también desveló el amplio intercambio genético resultante del cruce entre estos grupos tras su divergencia. Ese mestizaje enturbió las tentativas previas de reconstruir la genealogía del perro.



*El tamaño de la población de bóxer no puede calcularse con los datos disponibles.

FUENTE: «GENOME SEQUENCING HIGHLIGHTS THE DYNAMIC EARLY HISTORY OF DOGS», POR ADAM H. FREEDMAN ET AL., EN *PLOS GENETICS*, VOL. 10, N.º 1, ARTÍCULO N.º E1004016, 16 DE ENERO DE 2014; TIFFANY FARRANT-GONZALEZ (*gráfico*); PORTIA SLOAN ROLLINGS (*perros*)

También daban caza a los lobos. Los cánidos son el segundo mamífero más abundante en el yacimiento, solo superado por el mamut. Los restos incluyen siete cráneos enteros, cuyo aspecto no siempre concuerda plenamente con el cráneo de un lobo.

Mietje Germonpré, paleontóloga del Real Instituto de Ciencias Naturales de Bélgica, en Bruselas, destaca tres de ellos por su singularidad. Comparados con los cráneos de lobo hallados en el mismo lugar, estos tres presentan el hocico más chato, la caja craneana más ancha y dientes más juntos.

Ese tipo de cambios anatómicos son los primeros signos de la domesticación, aseguran Germonpré y otros expertos. Y se asemejan a los que presenta el cráneo del zorro plateado (variedad melánica del zorro común), que protagoniza un célebre experimento llevado a cabo por investigadores de la Universidad estatal de Novosibirsk. Desde 1959, han seleccionado y criado zorros de esa variedad por su mansedumbre. Con el paso de las generaciones, el pelaje ha adquirido manchas, las orejas se han caído, la cola se ha curvado y el hocico se ha achatado y ensanchado, todo a pesar de haber sido seleccionados únicamente por su temperamento. Otras especies domesticadas, como las ratas y el armiño, muestran cambios similares. Hasta hoy se ignora por qué los animales domesticados sufren esa transformación. Se sabe que el zorro manso tiene glándulas suprarrenales más pequeñas y niveles mucho más bajos de adrenalina que su congénere salvaje.

El año pasado otro grupo planteó una hipótesis contrastable: las células de la cresta neural de los animales mansos podrían resultar más escasas o defectuosas. Estas células embrionarias desempeñan un cometido clave en el desarrollo de la dentición, las mandíbulas, las orejas y las células pigmentarias, así como en el sistema nervioso y en la conducta de lucha o huida. Si los expertos están en lo cierto, todos esos rasgos que confieren un aspecto afable (las manchas en el pelaje, la cola curvada y las orejas péndulas) serían efectos secundarios de la domesticación.

Germonpré sospecha que la presunta domesticación observada en Predmostí constituye una vía evolutiva muerta; duda de que esos animales guarden relación alguna con los perros actuales. Sin embargo, opina que se trata de perros paleolíticos. Afirma que el aspecto de esos canes primitivos se asemejaría mucho al del husky moderno, aunque seguramente serían más corpulentos, de la talla de un pastor alemán. Germonpré califica los especímenes de Predmostí como «perros» porque supone algún tipo de relación entre los cánidos y los gravetienses. Así lo hace pensar el hallazgo de un maxilar inferior de perro cerca del esqueleto de un niño, según se refiere en el cuaderno del primer excavador del lugar.

Los perros también formaban parte de los rituales de un modo distinto a cualquier otra especie. En un caso, un gravetiense introdujo lo que sería un trozo de hueso de mamut entre los dientes de uno de los cráneos de perro tras la muerte del animal y, a continuación, cerró sus fauces. Germonpré piensa que un antiguo cazador de mamuts depositó el hueso como parte de un ritual vinculado con la caza, como sustento para la otra vida o para que el perro pudiera ayudar al hombre en el más allá. «Estos rituales se observan también en el registro etnográfico», afirma. Cita como ejemplo una ceremonia chukchi en Siberia, por una mujer fallecida a inicios del siglo xx, en la que se sacrificó un reno cuyo estómago se introdujo en la boca de un perro muerto. Este, a su vez, fue depositado junto a la mujer para protegerla en su último viaje.





VIDAS DE PERRO: Los perros del yacimiento checo de Predmostí, de 27.000 años de antigüedad, posiblemente fueron criados para ser sacrificados en rituales (*cráneo, arriba*). Los canes de los chiribaya en Perú eran venerados hace mil años como perros pastores (*momia, abajo*).

MIETJE GERMONPRÉ, REAL INSTITUTO DE CIENCIAS NATURALES DE BÉLGICA (*cráneo*); MARIANA BAZO, REUTERS (*momia*)

Muchos estudiosos creen que aquellos primeros hombres iniciaron la domesticación del lobo con el fin de contar con su ayuda en la caza mayor. En su libro *The invaders*, publicado por Harvard University Press a principios de este año, la antropóloga Pat Shipman equipara los primeros perros (o lobos-perro, como los llama) a un avance tecnológico que ayudó a que los hombres modernos desbancaran a los neandertales. Pero tanto ella como Wayne, Larson y otros opinan que los lobos se aliaron con los hombres por iniciativa propia; es decir, que este astuto y versátil cánido vio en nosotros algo así como un nuevo nicho ecológico que podía explotar. La otra posibilidad, que los humanos saquearan sin más las guaridas de lobos para robar cachorros lo bastante jóvenes como para domarlos, habría sido una empresa peligrosa. Y criarlos en los campamentos rodeados de niños pequeños habría supuesto otra temeridad.

«[La domesticación] no fue deliberada, por lo menos en sus orígenes», conjetura Larson. Probablemente los lobos comenzaron a seguir a los grupos humanos por la misma razón que las hormigas entran en nuestras cocinas, «para aprovechar un recurso alimentario, nuestra basura». Con el tiempo, algunos de esos lobos que merodeaban y seguían a los campamentos nómadas acabaron perdiendo el temor a los humanos (y viceversa) y nació entre ambos una relación de mutualismo. Los lobos-perro localizarían con el olfato las presas y a cambio recibirían parte de la carne. (Una prueba circunstancial de este supuesto procede del experimento con el zorro plateado. Al seleccionar los menos temerosos, los investigadores de Novosibirsk han acabado creando un zorro plateado que corre a saludar a la gente. La mayoría de los zorros criados en cautividad se agazapan en el fondo de la jaula.)

Solo hay un problema con esa hipótesis, por lo menos en Predmostí: los perros primitivos de Germonpré no consumían carne de mamut, aunque esta fuera la cena de los humanos; el análisis isotópico de los huesos de estos perros del Paleolítico indica que comían reno, que no era el manjar predilecto de los lugareños. También mostraban dientes rotos y varias heridas profundas en el rostro, cicatrizadas en su mayoría. «Pueden ser



CORAZÓN SALVAJE: El modo exacto en que el ancestro lupino del perro inició la senda de la domesticación sigue siendo un misterio.

señales de lucha con otros perros o la secuela de un apaleamiento», aclara Germonpré. Ella concibe el nacimiento del vínculo entre hombre y perro a través de los rituales de los cazadores de mamuts. En este escenario, los cazadores-recolectores traerían cachorros a sus campamentos, quizá después de haber matado lobos adultos, de igual manera que los nómadas actuales traen crías o animales juveniles a sus asentamientos. Los huesos de mamut de Predmostí no muestran indicios de haber sido mordidos por cánidos, lo cual incita a pensar que no campaban libres ni podían hurgar a voluntad entre los despojos. Lo más probable es que permanecieran atados, recibieran las sobras de alimentos de los humanos y que estos incluso los criaran; todo para asegurar el suministro de víctimas para los sacrificios rituales.

La crianza en cautividad del lobo daría lugar a los cambios anatómicos que Germonpré ha constatado en los perros de Predmostí e incluso a un animal menos temeroso y más dependiente, tal y como se ha visto en los zorros de Novosibirsk.

Recluidos, maltratados y alimentados con despojos, los perros de Predmostí aprenderían el significado del «¡No!». Ni en ese ni en otros yacimientos de edad similar donde se han desenterrado restos caninos se aprecian indicios de que los antiguos cazadores-recolectores consideraran a los cánidos como amigos, compañeros o colegas de caza, observa Germonpré. Tal relación se forjaría después.

SUERTE CAMBIANTE

Si Germonpré se halla en lo cierto, la domesticación del perro habría comenzado bastante pronto y en circunstancias poco halagüeñas para el cánido. No todos concuerdan en que los animales descritos por Germonpré correspondían a perros, empero. Algunos prefieren la designación de lobo-perro o, simplemente, de lobo, dado que su categoría taxonómica no está clara, ni por su morfología ni por su genética. (Larson espera resolver este dilema en el curso de su megaproyecto.)

El primer ejemplo indiscutible de perro, un espécimen de 14.000 años del yacimiento de Bonn-Oberkassel en Alemania, cuenta una historia muy distinta de la domesticación y revela un vínculo mucho más afectivo con los humanos. A inicios del siglo xx, los arqueólogos que excavaban el lugar desenterraron la osamenta de un perro que yacía en una tumba junto a los restos de un hombre de unos 50 años y una mujer de 20 o 25. Por la disposición del conjunto, supieron que estaban ante un animal domesticado, uno tenido en tanta estima que merecía ser enterrado como un miembro más de la familia.

El perro de Bonn-Oberkassel no es el único sabueso prehistórico que ha recibido semejante trato. En Ain Mallaha, un yacimiento de cazadores-recolectores datado en 12.000 años situado en el tramo superior del valle del Jordán en Israel, los arqueólogos descubrieron el que tal vez sea el entierro más célebre de un hombre y un perro. El esqueleto de un anciano yacía acurrucado sobre el costado derecho, con el brazo izquierdo estirado bajo la cabeza y la mano apoyada con delicadeza sobre un cachorro. De cuatro o cinco meses, se presume que fue depositado allí por ser compañero del difunto. A diferencia de los perros de Predmostí, este cachorro no había sido maltratado; alguien lo había dejado allí amorosamente junto a quien debió cuidarlo.

Si bien las escenas conmovedoras como la relatada son poco frecuentes en ese período, las tumbas de perros no lo son. Al cabo de unos 10.000 años, la costumbre de dar sepultura a los canes floreció. Ningún otro animal goza de tanta presencia en los rituales funerarios. La gente acabó por considerar a los perros de un modo distinto y ese cambio de actitud ejerció una profunda influencia

en su evolución. Tal vez fue en ese período cuando el perro adquirió sus habilidades sociales humanas, como saber interpretar las expresiones faciales de sus dueños, entender el gesto de señalar y mirar fijamente a sus ojos (lo cual aumenta la oxitocina, la «hormona del amor», tanto en el perro como en el amo).

«Los enterramientos caninos aparecen una vez que la caza se traslada de las planicies abiertas a los bosques densos», aclara Angela Perri, zooarqueóloga del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva en Leipzig y especialista en tales rituales. «Los perros de entornos abiertos pueden servir para acarrear la carne del mamut abatido, pero no tienen por qué ayudar a cazarlo», opina, al tiempo que señala que los cazadores de elefantes no usan perros. «En cambio, los perros son excelentes para la caza de piezas menos voluminosas que viven en los bosques, como el ciervo o el jabalí».

Hace al menos 15.000 años, o quizás algo antes, afirma Perri, los cazadores-recolectores de Europa, Asia y América comenzaron a depender de las aptitudes de caza de sus perros para sobrevivir. Los especialistas no pueden trazar un linaje directo entre esos animales y nuestras mascotas, pero opinan que eran canes sin ningún género de duda. «Un buen perro de caza da con rastros recientes, guía al cazador y sabe retener la presa», explica Perri, que ha visto en acción a cazadores tradicionales y a sus perros en Japón y EE.UU. «Desde el momento en que comienzan a participar en las cacerías, se aprecia un cambio de aptitud y surgen enterramientos por doquier. No se trata de rituales ni de sacrificios, sino de enterramientos motivados por el respeto, en los que el perro es sepultado junto con ocre, puntas de piedra y hojas; en definitiva, útiles de caza».

Uno de los entierros más refinados es el de Skateholm, en Suecia, fechado en unos 7000 años. Junto a los sepulcros de docenas de personas yacían los de varios perros. Uno de ellos había recibido el mejor trato de todos los que allí se hallaban, ya fueran hombres o perros. «Yacía de costado, con lascas de sílex esparcidas sobre su cintura, astas de ciervo y una maza de piedra labrada, y había sido espolvoreado con ocre rojo», relata Perri. No hay ningún indicio sobre el motivo de esa veneración, pero presume que debió tratarse de un soberbio cazador y que su amo lamentó profundamente su muerte. «Este lazo entre cazador y perro se ve hoy en el registro etnográfico», comenta Perri, y añade que a los cazadores-recolectores de Tasmania de finales del siglo XIX se les atribuye la siguiente opinión: «Nuestros perros son más importantes que nuestros hijos. Sin ellos no podríamos cazar y moriríamos.»

Los primeros canes prestaban otros servicios importantes. El primer intento conocido de selección deliberada que ha modelado la evolución de *C. familiaris* procede de un yacimiento danés de 8000 años de antigüedad. Los antiguos cazadores-recolectores del lugar contaban con perros de tres tallas distintas, posiblemente criados para tareas concretas. «No esperaba ver nada parecido a una raza canina», confiesa Perri, «pero tenían perros pequeños, medianos y grandes». Se ignora el uso que daban a los pequeños, pero los medianos presentaban la constitución de perros de caza, y los grandes, del tamaño de perros de trineo groenlandeses (de unos 30 kilogramos), tal vez transportaran y arrastraran sus pertenencias. Con sus ladridos, todos habrían servido como guardianes del campamento.

La posición del perro decayó con la aparición de la agricultura. En los primeros poblados agrícolas no abundan los enterramientos caninos. «La diferencia es muy patente. Mientras los humanos vivían de la caza y de la recolección, las tumbas caninas se contaban por miles». Pero a medida que el cultivo de la tierra ganó terreno, los entierros tocaron a su fin. Los perros ya no resultaban tan útiles. No obstante, tal declive no los condenó a la extinción. En muchos lugares acabaron convertidos en manjar, un nuevo motivo para proseguir con la cría.

Sin embargo, no todas las culturas agrícolas los incorporaron a su dieta. En las comunidades ganaderas a veces se los criaba para el pastoreo. Aquellos que probaban su valía en esta tarea seguían recibiendo mimo hasta después de la muerte. En 2006, los arqueólogos descubrieron 80 perros momificados en sepulturas cercanas a las de sus amos en un antiguo cementerio próximo a Lima, de 1000 años de antigüedad. Los perros habían vigilado los rebaños de llamas de los chiribaya y en pago por sus servicios recibían un buen trato en vida y muerte. Una treintena estaban envueltos en sudarios finamente tejidos con lana de llama y reposaban junto a huesos de ese animal y espinas de pescado colocados cerca de su boca. El clima árido de la región momificó los restos y conservó el pelaje y los tejidos. Desenvueltas, las momias recuerdan a los pequeños perros callejeros que vagan por la Lima actual, en busca de un hombre que los adopte. (Pese a esa semejanza, los perros pastores de los chiribaya no tienen parentesco alguno con los chuchos de la Lima actual. Tampoco existen indicios que permitan vincular las razas antiguas con alguna de las actuales aceptadas por las sociedades caninas.)

Pese a que los restos de perros de la tribu chiribaya y los hallados en otros enterramientos de América se hallan muy lejos del lugar y momento idóneos para representar las primeras fases de la domesticación, Larson y sus colaboradores se alegran de poder medir los esqueletos y extraer muestras de su ADN. Ello se debe a que esos primeros perros americanos descienden de los primitivos perros europeos o asiáticos; su esqueleto y sus genes ayudarán a determinar el número de episodios de domesticación y dónde tuvieron lugar. En su pretensión de estudiar tantos cánidos antiguos como sea posible, hasta el presente los investigadores han analizado más de 3000 lobos, perros y otros especímenes de difícil clasificación dentro de esas dos categorías. Más de medio centenar de especialistas de todo el mundo colaboran en la empresa. Esperan tener listo un artículo con sus primeros resultados este mismo año.

¿Conoceremos por fin dónde y cuándo fue domesticado el perro? «Desearía hallarme muy cerca de la respuesta», confiesa Larson. Pero todavía no sabemos exactamente cómo un lobo ya hace tiempo desaparecido acabó convirtiéndose en un animal que acata nuestras órdenes.

PARA SABER MÁS

Palaeolithic dog skulls at the gravettian Predmostí site, the Czech Republic. Mietje Germonpré et al. en *Journal of Archaeological Science*, vol. 39, n.º 1, págs. 184-202, enero de 2012.

Rethinking dog domestication by integrating genetics, archeology, and biogeography. Greger Larson et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 109, n.º 23, págs. 8878-8883, junio de 2012.

Genome sequencing highlights the dynamic early history of dogs. Adam H. Freedman et al. en *PLOS Genetics*, vol. 10, n.º 1, art. e1004016, enero de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Domesticación del perro. Relaciones entre perro y lobo. Carles Vilà en *IyC*, marzo de 1999.

Origen de los perros del Nuevo Mundo. Jennifer Leonard y Carles Vilà en *IyC*, febrero de 2004.

La domesticación del gato. Carlos A. Driscoll et al. en *IyC*, agosto de 2009.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



Sincronizados con los demás

Del chip a la Web, el desarrollo de las comunicaciones ultrarrápidas nos recuerda que poner nuestro reloj en hora es un problema... de relatividad

Las transacciones financieras, el transporte aéreo o ciertos cálculos efectuados por ordenador exigen un tiempo extremadamente preciso y fiable. ¿Cómo estar seguros de tener la misma hora que los otros, dado que estos se hallan lejos y que los intercambios de información se hacen, en el mejor de los casos, a la velocidad de la luz? Aunque ello evoque la idea de instantaneidad en el imaginario colectivo, hoy tenemos, en el bolsillo o en la oficina, dispositivos lo bastante rápidos para recordarnos que esa velocidad tiene un valor finito: en un nanosegundo, duración del ciclo correspondiente a una cadencia de microprocesador de un gigahercio, la luz no recorre más que 30 centímetros. Tras las dificultades prácticas que se muestran, se esconde una cuestión absolutamente fundamental: la sincronización de los relojes y la construcción del espaciotiempo tal como la concibió Einstein en 1905.

De la telefonía GSM a los chips electrónicos

Un primer ejemplo atañe a la telefonía móvil. Los teléfonos GSM (por *Global System for Mobile Communication*) transmiten la voz codificada numéricamente bajo la forma de ondas de radio, más exactamente de microondas de entre 0,9 y 1,8 gigahercios de frecuencia. Cada teléfono se dirige a la antena más próxima, pero cada antena solo puede admitir a la vez ocho teléfonos: sobre un tramo regular de 4,615 milisegundos, cada teléfono dispone por turno de una ventana temporal de un octavo de ese período, o sea, 0,577 milisegundos.

Para un buen funcionamiento, hay que asegurar una perfecta coordinación temporal de las emisiones y recepciones de información entre la antena y los teléfonos. Mientras las distancias sean cortas, no será menester preocuparse de la duración de la propagación de la onda de radio entre el teléfono y la antena. Pero en zonas rurales, donde las distancias pueden llegar a los 30 kilómetros o más, esa duración rebasa los 100 microsegundos, es decir, aproximadamente un quinto del intervalo temporal disponible para comunicar. Para ser puntual y evitar el solapamiento de los huecos, debe por ello enviar su señal adelantada. Ese plazo lo determina el servidor de la antena emisora, el cual calcula la distancia del teléfono midiendo el tiempo de las idas y retornos de las señales.

En las redes de telecomunicación por fibra óptica, el problema se agudiza, ya que el caudal de transmisión y las distancias recorridas son mayores. Fijar un mismo tiempo para todos es un problema similar al de coordinar a un gran número de atletas repartidos en un estadio para que efectúen un mismo movimiento. Como el sonido tarda 0,3 segundos en recorrer 100 metros, si todos los gimnastas siguen el ritmo de un mismo altavoz, el desfase entre ellos será evidente. La solución será multiplicar el número de altavoces de proximidad.

De forma análoga, en las redes, los nodos principales se dotan de relojes atómicos extremadamente precisos y estables cuya información temporal se transmite a los relojes llamados esclavos. Estos son capaces de regenerar esa información para alimentar los relojes de los niveles inferiores del árbol de direcciones y seguir suministrando el tiempo exacto si el reloj primario se avería.

Con todo, sigue siendo indispensable poner en hora los relojes principales, es decir, sincronizarlos. Por otra parte, aunque este enfoque funciona en una red organizada en estrella, se hace más problemático en redes más ramificadas como Internet, donde la propagación puede discurrir por caminos diferentes, con unos tiempos de transferencia entre nodos fluctuantes. Ello impone unos protocolos de comunicación cada vez más elaborados.

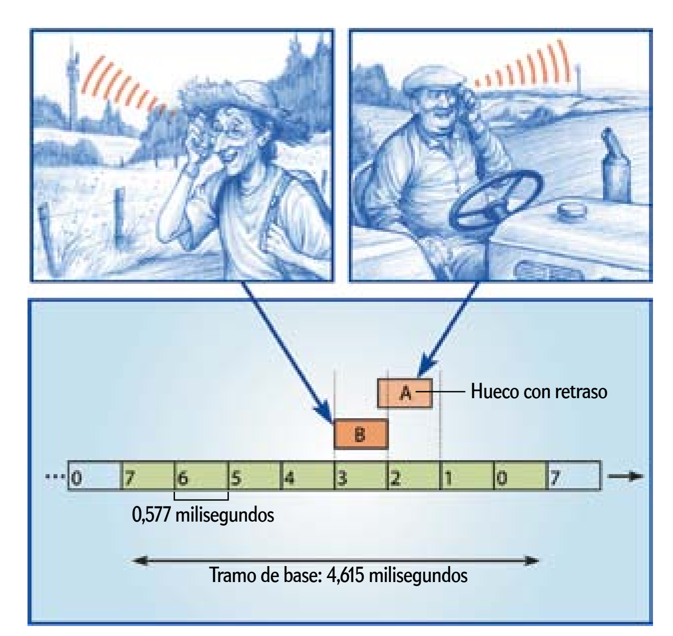
La cuestión de la sincronización se plantea incluso dentro de un chip electrónico o en los grandes superordenadores: en un nanosegundo, la señal eléctrica recorre menos de un centímetro en la superficie del chip; ahora bien, para que los cálculos se efectúen correctamente, es esencial que las señales de entrada de un elemento lógico lleguen a la vez.

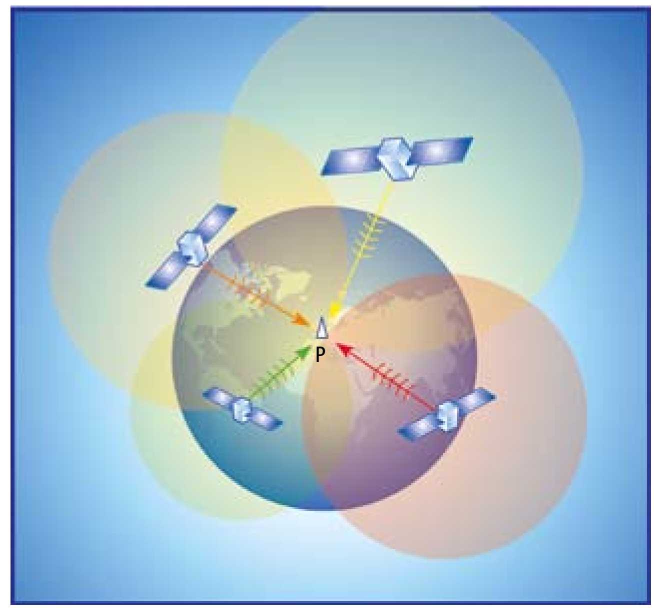
Bajo todas esas cuestiones prácticas o técnicas subyace una cuestión fundamental: ¿cómo definir un mismo tiempo para todos? ¿Cómo sincronizar relojes situados en puntos diferentes del espacio? De una reflexión como esta sobre el tiempo y el espacio arrancaba el artículo de 1905 de Einstein acerca de la relatividad. Einstein constata que, especialmente a causa del valor finito y absoluto (independiente del observador) de la velocidad de la luz, no puede existir un tiempo absoluto. Construye entonces el espacio y el tiempo únicamente a partir de objetos físicos: relojes y ondas electromagnéticas.

Lo que llamamos un sistema de referencia espaciotemporal es, por ello, un conjunto de relojes idénticos situados en cada punto del espacio. Un reloj determina su distancia a los vecinos midiendo cuánto tarda una señal electromagnética, o sea, la luz, en ir y volver, tal como lo hace una antena GSM con un teléfono móvil.

El tiempo construido con objetos físicos

Los relojes pueden luego sincronizarse, siempre por intercambio de señales electromagnéticas: dos relojes A y B se dicen sincronizados si, cuando B reemite hacia A la señal recibida de este, la hora t_B de esa reemisión en B es la media de las horas de emisión t_A y de recepción t_A' en A (es decir, si $t_B = (t_A + t_A')/2$).





EN EL SISTEMA DE TELEFONÍA MÓVIL GSM, cada antena admite a la vez las señales de ocho teléfonos. A cada uno de estos se le asigna un hueco de 0,577 milisegundos (con capacidad para transmitir hasta 148 bits de información) en cada tramo temporal de 4,615 milisegundos. Para ajustar los instantes de emisión, hay que tener en cuenta la distancia antena-teléfono. Si no, el hueco de un teléfono que se halle por ejemplo a 30 kilómetros de la antena sería desplazado, al ser recibido por aquella, en 0,1 milisegundos y se montaría sobre el hueco siguiente recibido de un teléfono cercano a la antena.

LA GEOLOCALIZACIÓN POR SATÉLITE necesita un conjunto de al menos cuatro satélites cuyos relojes estén perfectamente sincronizados. La medida de la distancia a tres satélites basta en principio para determinar la posición del aparato de localización (*P*), pero la medida por *P* de esa distancia, determinada por las duraciones de los trayectos de ida y vuelta de las señales, exige que *P* esté en hora con los satélites. Ese ajuste del reloj de *P* necesita la presencia de un cuarto satélite: los cuatro satélites facilitan así los datos requeridos para determinar las cuatro coordenadas (tres espaciales y una temporal) del aparato *P*.

BRUNO VACARO

Esta filosofía de la construcción del espaciotiempo se aplica a los sistemas de geolocalización por satélite, como el GPS estadounidense o el futuro Galileo europeo. Así, el sistema de referencia GPS está formado a partir de relojes atómicos a bordo de una constelación de satélites y sincronizados, por el método recién descrito, con los relojes de referencia situados en el suelo.

Sin embargo, los relojes se mueven y evolucionan en el campo gravitatorio terrestre, lo que modifica los ritmos relativos y complica mucho la situación. En la práctica, se efectúan unas correcciones tales que, en cada instante, la hora indicada por cada satélite sea idéntica a la que indicaría un reloj inmóvil en el mismo lugar y en ausencia de campo gravitatorio.

Es este sistema de referencia temporal el que hoy permite a cada uno localizarse fácil y rápidamente, esté donde esté. Cada satélite emite regularmente una señal datada. Nuestro receptor, sea un aparato especializado o un teléfono móvil, compara esa hora con la hora de referencia de su reloj y de ello deduce el tiempo que la señal ha tardado en llegarle y, por tanto, la distancia hasta el satélite emisor. Midiendo de ese modo las distancias que separan a nuestro instrumento de al menos tres satélites, se determina sin ambigüedad nuestra posición en tierra.

¡Pero ello da por supuesto que nuestro instrumento está sincronizado! Ahora bien, nuestro aparato no dispone de un reloj capaz de conservar el tiempo con un error menor que una decena de nanosegundos (lo que tarda la luz en recorrer tres metros). En realidad, podemos conformarnos con un reloj de calidad bastante inferior, a condición de que esté continuamente poniéndose en hora utilizando las señales que recibe de los satélites. Para un lugar y un instante de recepción dados, basta con emplear las informaciones recibidas de cuatro satélites diferentes, es decir, cuatro datos para reconstituir las cuatro coordenadas espaciotemporales del evento de detección (tres coordenadas de posición, una coordenada de tiempo). Además de indicar nuestra posición, el sistema de localización pone constantemente en hora el reloj de nuestro aparato y nos facilita así la hora «exacta».

Que se sepa: la velocidad finita de propagación de la luz y la sincronización de los relojes son, a día de hoy, los dos nutrientes de la comunicación y de la geolocalización.

PARA SABER MÁS

Relativistic causality and clockless circuits. Ph. Matherat y M.-T. Jacekel en *ACM Journal of Emerging Technologies in Computing Systems*, vol. 7, n.º 4, art. 20, 2011. Disponible en **http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00389739/fr**

Should we bother with the speed of liht in everyday life? A closer look at GSM technology. T. Kawalec en *Physics Education*, vol. 47, n.º 5, págs. 579-583, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

El sistema global de posicionamiento. Thomas A. Herring en *IyC*, abril de 1996.

La reestructuración del GPS. Per Enge en *IyC*, julio de 2004.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



Por qué hay tantos García

... y por qué será difícil que acaben desapareciendo

—Soy Aragorn, hijo de Arathorn, heredero de Isildur, señor de los dúnedain, sucesor del trono de Gondor, apodado Trancos, capitán de los montaraces del norte.
—¿El de la Paqui?
—El mayor.

(Leído en Facebook)

Tiempo ha, los humanos poblaban el planeta agrupados en clanes aislados. En esos grupos reducidos bastaba un nombre para identificar a los individuos. Sin embargo, a medida que el tamaño de las comunidades fue aumentando, surgió la necesidad de añadir calificativos a cada persona para evitar confusiones.

Los apellidos constituyen una forma relativamente moderna de solventar el problema. Si bien en China la tradición de heredarlos de los progenitores se remonta a hace unos 5000 años, en la mayor parte de Europa la costumbre apenas cuenta ocho siglos. En el caso de Noruega solo llega a 150 años, y en Turquía se instauró en 1934.

La procedencia de los apellidos resulta extraordinariamente variada. Un origen muy común es el patronímico, que indica la ascendencia a través de sufijos o prefijos. Así, en Martín Fernández de Navarrete, Alberto Rodríguez de Lista y Aragón, y José Sánchez Cerquero, el sufijo *-ez* indica «hijo de» (Fernando, Rodrigo y Sancho, respectivamente). Hay equivalentes en numerosas culturas: el sufijo *-son* en sueco (Lennart Carleson), *-sen* en danés (Johan Jensen) o la palabra *ibn* en árabe (Thabit ibn Qurra). Son muy comunes también los topónimos (como en Aristarco de Samos o Arquímedes de Siracusa), los apellidos que indican alguna característica geográfica o arquitectónica (Leonardo Torres Quevedo o Francisco Vera Fernández de Córdoba) o aquellos que aluden al aspecto físico (Felix Klein, «pequeño»; Marcel Grossmann, «hombre grande», o Alfred North Whitehead «canoso»).

En la página web del Instituto Nacional de Estadística español (www.ine.es) puedo consultar la frecuencia de mi primer apellido, Luque. Según el padrón de 2014, un total de 39.297 personas lo tienen como primer apellido, mientras que 39.657 lo tienen como segundo. Eso supone una proporción de la población española del 0,840 y 0,848 por mil, respectivamente. Sin embargo, solo 694 individuos son Luque de primer y segundo apellido. Casualmente, uno de ellos es mi padre. Dicha cifra representa un 0,015 por mil de la población, muy por debajo del producto $0{,}840 \times 0{,}848$ que esperaríamos si las probabilidades fuesen independientes. Sin duda, el tabú social del incesto sigue vigente.

Una aplicación en la misma web permite representar la distribución por provincias de todos los individuos apellidados Luque. Con diferencia, Córdoba, Málaga y Sevilla son las que presentan números más elevados, a las que siguen Barcelona y Madrid. Al ver el mapa de España, podemos intuir el origen y la dispersión del apellido. Mi padre nació en Córdoba y, en los años sesenta, emigró como tantos otros a Barcelona. Sin duda, los apellidos cuentan numerosas historias de nuestro pasado.

Ese es uno de los temas del extraordinario libro que he estado leyendo este verano, *Genes y genealogías: Sobre nuestra herencia cultural y biológica*, escrito por los físicos Susanna Manrubia y Damián Zanette y ganador en 2012 del Premio Europeo de Divulgación Científica, convocado por la Universidad de Valencia. En él podemos constatar que el apellido más común en España es nuestro querido García, que comprende al 3,16 por ciento de la población. ¿Gozan los García de una potencia sexual portentosa? De ser así, palidece al compararla con la de los Nguyen, que en Vietnam constituyen casi el 40 por ciento de la población. En Francia hay unos 68.000 García, apellido que allí ocupa la posición número 50. ¿Disminuye esa potencia si se afrancesa?

El proceso de Galton-Watson

La tabla adjunta reproduce los 14 apellidos más frecuentes en España y Estados Unidos. Como podemos ver, las distintas «familias» presentan un número muy distinto de miembros. ¿A qué se debe?

El tamaño limitado de las poblaciones y la fertilidad de las parejas parecen clave. Si una pareja engendra muchos varones, la probabilidad de que un apellido adquiera predominancia aumentará. Sin embargo, si no tiene descendencia, contribuirá a que ese apellido desaparezca. Dado que este último hecho tiene una probabilidad no nula, parece plausible que, tras un número suficiente de generaciones, todos los apellidos (menos uno) acaben desapareciendo. ¿O no?

Sobre tales cuestiones rumiaba el ecléctico Sir Francis Galton en la Inglaterra victoriana de finales del siglo XIX. Galton hizo contribuciones pioneras en áreas tan diversas como la psicología, la biología o la meteorología. En estadística, es recordado por el uso de la distribución normal y el concepto de correlación, por su famoso quincunce o por la regresión a la media. En el marco de sus especulaciones eugenésicas, se preocupó por el declive de las familias ilustres en la época victoriana, al observar que apellidos que una vez fueron comunes se habían vuelto raros o incluso habían desaparecido.

Galton señaló como posible explicación la correlación entre una capacidad intelectual elevada y una fertilidad baja. Aunque tampoco descartaba el puro azar, como proponía el botánico Alphonse de Candolle. En 1873, para dar cuenta de la probabilidad de desaparición de un apellido, Galton planteó en la revista *Educational Times* un sencillo modelo.

Al poco tiempo, el matemático Henry William Watson dio con una solución y, en 1875, ambos la publicaron en un artículo

r	España	$\frac{N(r)}{N(r+1)}$	Estados Unidos	$\frac{N(r)}{N(r+1)}$
1	García 1.476.378	1,5876	Smith 2.376.206	1,2795
2	González 929.938	1,0017	Johnson 1.857.160	1,2106
3	Rodríguez 928.305	1,0068	Williams 1.534.042	1,1115
4	Fernández 922.007	1,0542	Brown 1.380.145	1,0127
5	López 874.610	1,0451	Jones 1.362.755	1,2083
6	Martínez 836.877	1,0209	Miller 1.127.803	1,0517
7	Sánchez 819.743	1,0484	Davis 1.072.335	1,2494
8	Pérez 781.906	1,5853	García 858.289	1,0672

GRANDES FAMILIAS: Abundancias absolutas de los catorce apellidos más frecuentes en España y Estados Unidos en 2014 y 2010, respectivamente (en el caso de España, los datos se refieren al primer apellido). El cociente $N(r)/N(r+1)$ indica la proporción entre el número de individuos del rango r y los del siguiente. A pesar de las diferencias de población, culturales e históricas, dicha distribución parece seguir una pauta común en todos los casos.

FUENTES: INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (PADRÓN DE 2014) Y CENSO ESTADOUNIDENSE DEL AÑO 2000.

titulado «Sobre la probabilidad de extinción de las familias». Su modelo, hoy conocido como proceso de Galton-Watson, daría lugar a toda un área de estudio: los procesos de ramificación. Este campo se dedica a investigar aquellos problemas en los que aparecen poblaciones de elementos capaces de reproducirse. Los elementos pueden ser bacterias, neutrones en un reactor nuclear... o apellidos.

La pregunta planteada por Galton era esta: si la probabilidad de que un individuo tenga n hijos viene dada por $p(n)$ (con $n = 0, 1, 2...$), y si suponemos que, tras el nacimiento de cada nueva generación, los progenitores mueren, ¿cuál será la probabilidad de que, al llegar a una generación dada, el linaje se haya extinguido?

Para responderla, Watson razonó del siguiente modo. Llamemos q_1 a la probabilidad de que la estirpe se extinga en la primera generación. En tal caso, sabemos que $q_1 = p(0)$. Con este dato, ¿cuál será la probabilidad q_2 de que el linaje se extinga en la primera o en la segunda generación?

Ahora existen varias posibilidades. Puede suceder que no haya descendientes en la primera generación, algo que sabemos que ocurre con probabilidad $p(0)$. Pero también puede que nazca un hijo en la primera generación y que este no tenga prole, algo que sucederá con probabilidad $p(1)\,p(0)$. En general, la probabilidad de que haya n hijos en la primera generación y que ninguno de ellos engendre descendencia vendrá dada por $p(n)\,p(0)^n$. Así pues, la probabilidad total de extinción antes de la tercera generación será:

$$q_2 = p(0) + p(1)\,p(0) + p(2)\,p(0)^2 + \cdots = \sum_{n=0}^{\infty} p(n)\,p(0)^n .$$

Con gran astucia, Watson decidió atacar el problema de las generaciones posteriores definiendo la siguiente función:

$$G(x) = \sum_{n=0}^{\infty} p(n)\,x^n .$$

Si tomamos $x = 0$, obtenemos que $G(0) = p(0) = q_1$. Y si evaluamos $G(x)$ en $x = q_1$, el resultado es $G(q_1) = q_2$. Resulta sencillo convencerse de que la probabilidad q_n de que el linaje se extinga en n o menos generaciones viene dada por $q_n = G(q_{n-1})$, donde q_{n-1} representa la probabilidad de extinción en $(n-1)$ o menos generaciones. Así pues, la ecuación que nos proporcionará la probabilidad q_∞ de que la estirpe se extinga en un número indeterminado de generaciones vendrá dada por $q_\infty = G(q_\infty)$. Este tipo de expresiones reciben el nombre de «ecuaciones de punto fijo».

La función $G(x)$ se conoce como función generatriz ordinaria. No es más que una serie de potencias, una cuerda de tender en la que colgamos una sucesión de números para su exhibición, como gusta decir al matemático Herbert Wilf, autor de *Generatingfunctionology*, la biblia de las funciones generatrices. Veamos un ejemplo. Supongamos que $p(0) = p(1) = p(2) = 1/3$ (cuya suma es 1) y que $p(n) = 0$ para todo $n > 3$. El número medio de descendientes por individuo es:

$$\bar{n} = \frac{1}{3}\cdot 0 + \frac{1}{3}\cdot 1 + \frac{1}{3}\cdot 2 = 1 ,$$

por lo que, en promedio, la población se mantendrá constante. En este caso, la función generatriz viene dada por:

$$G(x) = \frac{1 + x + x^2}{3} .$$

La ecuación de punto fijo es $G(x) = x$, cuya única solución corresponde a $x = q_\infty = 1$. Es decir, con estas probabilidades de engendrar descendencia, alcanzaremos con toda seguridad la extinción de cualquier apellido.

Galton y Watson desconocían las probabilidades de reproducción reales, por lo que Watson probó con la función del ejemplo y también con la siguiente:

$$G(x) = \frac{(3 + x)^5}{1024} .$$

Esta función describe probabilidades normalizadas hasta $p(5)$. Sin embargo, el número medio de hijos por individuo asciende ahora a 1,25, de modo que la población crece exponencialmente. Al resolver $G(x) = x$, volvemos a encontrar la solución $x = q_\infty = 1$, por lo que Watson dedujo que también aquí la extinción estaba asegurada y que, probablemente, lo mismo ocurriría en cualquier caso razonable.

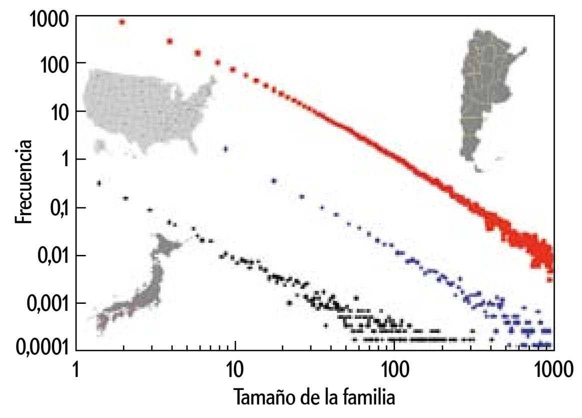
Hoy nos basta con apretar una tecla para resolver dicha ecuación, que en realidad tiene dos soluciones complejas, que no nos interesan, y tres reales: 1, −9,24 y 0,55. La última nos muestra que Watson estaba equivocado: no siempre acaban extinguiéndose todos los apellidos, al menos si su evolución se ajusta al sencillo modelo propuesto por Galton. De hecho, en el ejemplo elegido por el propio Watson, existe una probabilidad de 0,45 de que un linaje se mantenga indefinidamente.

Galton y Watson no supieron ver el papel esencial de la variación en el tiempo de las poblaciones. El resultado de Watson (la extinción de todos los apellidos existentes en la población inicial) es correcto para poblaciones decrecientes o constantes. Pero, en aquellas en aumento, existe un tamaño crítico del clan que, en la práctica, garantiza su supervivencia. Con todo, la solución de Watson se tuvo por correcta durante cincuenta años.

En su modelo, Galton había considerado una población inicial de 10.000 individuos con apellidos distintos. Volvamos al caso $p(0) = p(1) = p(2) = 1/3$. En la primera generación se extinguirán el 33,3 por ciento de los apellidos, aquellos correspondientes a los individuos sin descendencia. Siguiendo los pasos de Watson, podremos ver que en la segunda generación se habrán extinguido en torno al 48,2 por ciento y, en la tercera, el 57,1 por ciento. Sin embargo, el número de nuevas extinciones va disminuyendo en cada generación. Eso se debe a que los apellidos supervivientes forman familias cada vez más numerosas y con probabilidades de extinción cada vez menores.

¿Cuántas generaciones han de transcurrir para que se haya extinguido el 99,99 por ciento de los apellidos y solo

quede uno? Un sencillo cálculo nos dice que, para que eso ocurra, hacen falta unas 30.000 generaciones. Tomando 30 años por generación, en una población de 10.000 personas deberíamos esperar 9000 siglos. Si aumentamos el tamaño de la población inicial a un millón, el tiempo de espera alcanza los 90 millones de años. Buenas noticias para los García.



DISTRIBUCIÓN DE APELLIDOS: Frecuencias del tamaño de las familias (grupos de individuos con el mismo apellido) en Argentina, Estados Unidos y Japón en escala doblemente logarítmica. El eje de abscisas indica el tamaño posible de una familia; el de ordenadas, la frecuencia con que aparece una familia de ese tamaño (en unidades arbitrarias para una mejor visualización).

MODIFICADO DE «GENEALOGY IN THE ERA OF GENOMICS: MODELS OF CULTURAL AND FAMILY TRAITS REVEAL HUMAN HOMOGENEITY AND STAND CONVENTIONAL BELIEFS ABOUT ANCESTRY ON THEIR HEAD», S. C. MANRUBIA, B. DERRIDA Y D. H. ZANETTE EN *AMERICAN SCIENTIST*, VOL. 91, PÁG. 158, MARZO-ABRIL DE 2003.

Nuevos apellidos

Hoy disponemos de una ingente cantidad de información que no era accesible en los tiempos de Galton. Se conoce como «profundidad heráldica» el número de generaciones desde que se practica la herencia de los apellidos. Si de nuevo suponemos unos 30 años de media por generación, en China hablaríamos de una profundidad de 170 generaciones; en Europa, de unas 15, y en Japón, de 4. Sin embargo, a pesar de todas las diferencias históricas y de profundidad heráldica, la distribución de apellidos en culturas distintas parece seguir ciertas pautas universales.

En la tabla de la página anterior aparecen las 14 mayores familias (grupos de individuos con el mismo apellido) de España y Estados Unidos. Si llamamos $N(1)$ al número de individuos con el apellido más abundante, $N(2)$ al de personas con el segundo apellido más común, etcétera, vemos que, con independencia del país, los cocientes $N(1)/N(2)$, $N(2)/N(3)$, ..., $N(r)/N(r+1)$ siempre se encuentran cercanos a uno. Es más, en general, tienden a acercarse más a uno a medida que el rango del apellido r aumenta.

La gráfica que reproducimos aquí muestra la frecuencia con que aparecen familias de distintos tamaños en tres países: Argentina, Estados Unidos y Japón. Las tres distribuciones, en escala doblemente logarítmica y desplazadas artificialmente para una mejor visualización, resultan llamativamente semejantes. ¿A qué se debe?

Para dar cuenta de ello, Manrubia y Zanette proponen tres mecanismos básicos comunes a todas las culturas con apellidos heredables. Ya hemos visto dos: el gran número de generaciones que hacen falta para que todos los apellidos iniciales se extingan, y el crecimiento de la población. El tercero resulta más sutil: la aparición de nuevos apellidos.

No faltan ejemplos de familias con apellidos relacionados. Ya que este año celebramos el cuarto centenario de la publicación de la segunda parte del *Quijote*, tomemos el caso de Cervantes. Nos encontramos con variantes como Cerbantes, Ceruantes, Caruantes, Qarvantes, Serbantes, Seruantes, Servantes o Zervantes. Se trata de transcripciones diferentes de Cervantes, debidas probablemente a erratas en registros y documentos oficiales o a diferencias de pronunciación locales. Esa confusión se agudiza aún más en inglés, donde la distancia entre ortografía y pronunciación es mayor.

Aun suponiendo que los nuevos apellidos aparecen con muy poca frecuencia, debe llegar un momento en que la pérdida de diversidad debida a las extinciones del proceso de Galton-Watson se vea equilibrada por la aparición de apellidos nuevos. En una población con 10.000 individuos, a partir de la generación número 165 se pierde menos de un apellido por generación. De modo que una tasa de aparición de nuevos apellidos cercana a 1/10.000 bastaría para mantener unos 170 apellidos diferentes. Si a ello añadimos que la población crece, una tendencia mantenida a lo largo de la historia de la humanidad, el total de apellidos diferentes también aumentará con el tiempo.

Con estas ideas en mente, Manrubia y Zanette logran explicar las distribuciones observadas en los apellidos mediante un proceso de ramificación sencillo y elegante. El modelo parte de una población inicial de N_0 individuos con apellidos distintos. A medida que transcurren las generaciones, nacen individuos que, con una alta probabilidad $(1 - \alpha)$, heredan el apellido de su progenitor y que, con una probabilidad baja (α) cambiarán su apellido por uno nuevo. En cada paso de tiempo muere un individuo escogido al azar con probabilidad μ. La relación entre nacimientos y muertes determina el ritmo de crecimiento de la población, el cual puede ajustarse con datos demográficos reales.

Tras s nacimientos, Manrubia y Zanette demuestran que la probabilidad de que una familia tenga tamaño N es:

$$P(N) = C(s)N^{-\beta},$$

donde

$$C(s) = \frac{\alpha[N_0 + (1-\mu)s]}{1-\alpha-\mu}$$

y

$$\beta = 1 + \frac{1-\mu}{1-\alpha-\mu}.$$

Esta forma funcional reproduce a la perfección los numerosos ejemplos analizados por los autores. Ordenadas por rango, los tamaños de las familias siguen la ley $N(r) = r^{1-\beta}$, lo que explica el comportamiento del cociente que se desprende de nuestra tabla de apellidos. En efecto:

$$\frac{N(r)}{N(r+1)} = \left(1 + \frac{1}{r}\right)^{\beta-1}$$

tiende a 1 a medida que r aumenta.

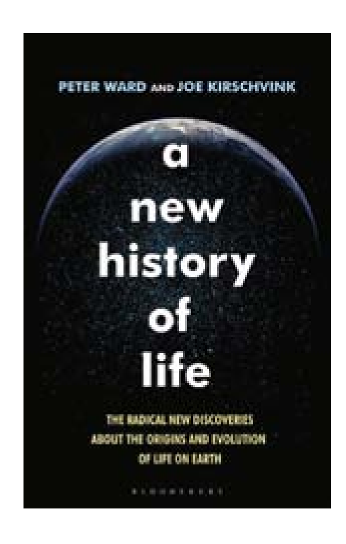
Con las tasas de mutación y crecimiento adecuadas a cada caso, las sencillas reglas propuestas por Manrubia y Zanette reproducen con gran fidelidad las distribuciones observadas. Los García han tenido suerte en la lotería de los apellidos. Y a estas alturas de la partida, si no es el cambio climático o la crisis económica, nadie los va a destronar.

PARA SABER MÁS

At the boundary between biological and cultural evolution: The origin of surname distributions. S. C. Manrubia y D. H. Zanette en *Journal of Theoretical Biology*, vol. 216, n.º 4, págs. 461-477, junio de 2002.

Genealogy in the era of genomics: Models of cultural and family traits reveal human homogeneity and stand conventional beliefs about ancestry on their head. S. C. Manrubia, B. Derrida y D. H. Zanette en *American Scientist*, vol. 91, pág. 158, marzo-abril de 2003.

Genes y genealogías: Sobre nuestra herencia cultural y biológica. Susanna Manrubia y Damián H. Zanette. Editorial Universidad de Valencia, 2014.



A NEW HISTORY OF LIFE. THE RADICAL NEW DISCOVERIES ABOUT THE ORIGINS AND EVOLUTION OF LIFE ON EARTH

Por Peter Ward y Joe Kirschvink. Bloomsbury, Londres-Nueva York, 2015.

Origen de la vida

Aparición de los primeros organismos

La historia de la vida está escrita en piedra, aunque no solo. Las cadenas de ADN registran sus pasos sucesivos. El avance de nuestra comprensión sobre cómo se originó la vida en una Tierra inicial con mimbres de materia inerte ha ido de la mano de nuestra capacidad para remedar el proceso en el laboratorio. Jack Szostak, premio nóbel, y su equipo llevan más de veinte años experimentando con moléculas que terminaron por desarrollarse en ARN [*véase* «El origen de la vida», por Alonso Ricardo y Jack W. Szostak; Investigación y Ciencia, noviembre de 2009]. Buscan obtener nucleótidos en solución para enlazarlos luego en cadenas cortas de ARN. Enhebrarlos en una cadena resulta más sencillo que conseguir que se reproduzcan, una vez constituidos. Para lograrlo hay que uncir al menos una treintena de esos nucleótidos, longitud mínima requerida para que la molécula de ARN adquiera una nueva propiedad: se convierta en catalizador y, de ese modo, promueva la activación de reacciones químicas; en particular, la reproducción del ARN en dos copias idénticas.

Para forjar, en los primeros momentos, dos hebras de ARN de una treintena de nucleótidos pudo contarse, a buen seguro, con la presencia de arcilla como molde. Un material arcilloso, la montmorillonita, parece el más indicado. En un escenario verosímil, los nucleótidos sueltos, que flotaran en un líquido, serían bombeados hacia la arcilla. Con esta se enlazarían débilmente y allí persistirían. En zonas arcillosas se formarían, pues, cadenas de 30 o más nucleótidos, que en razón de su frágil unión podrían romperse con facilidad. De alcanzarse alguna suerte de concentración de estas cadenas, que luego quedaran englobadas en una burbuja de líquido rica en lípidos, tendríamos los primeros componentes de una protocélula. Adquiriría esta una doble pared de lípidos con pequeñas cantidades de ARN en su interior; los nucleótidos pasarían por las grietas de la pared. Para funcionar, la célula necesitaría energía, lo que implicaba disponer de una maquinaria química apropiada. En el interior de las esferas habría, pues, distintos tipos de moléculas.

Tras decenios de investigación experimental y teórica sobre el origen de la vida se han cosechado importantes descubrimientos sobre las condiciones químicas y físicas bajo las cuales pudieron sintetizarse y polimerizarse compuestos orgánicos. Sin embargo, tales condiciones parecen mutuamente excluyentes, porque raramente se dan en un mismo asentamiento ambiental.

La vida hubo de esperar a que la temperatura planetaria se enfriara muy por debajo de la reinante en los primeros mil millones de años de historia de la Tierra, una de las múltiples razones para pensar que pudo haberse sintetizado en otro planeta, Marte por ejemplo. (O Venus. En el comienzo pudo haber estado en la zona habitable del Sol, aunque ahora tenga una temperatura superficial de 500 grados debido a un efecto invernadero que a buen seguro esterilizó su superficie.) El registro geológico de Marte pone de relieve que hubo allí cursos de agua. Agua que ahora se ha evaporado en el cuasivacío de su atmósfera o está helada. Si hubo vida en Marte, podría seguir habiendo en su subsuperficie, alimentada por la energía geoquímica de su degradación radiactiva.

Hace más de 4600 millones de años se formó una proto-Tierra a partir de la coalescencia de planetesimales (cuerpos pequeños de rocas y gases congelados que se condensaron en el plano de la eclíptica, la región plana del espacio donde orbitan todos los planetas). El nuevo planeta comenzó una transformación radical. Hace unos 4560 millones de años, la Tierra empezó a dividirse en capas, cuya región más interna era un núcleo compuesto de hierro y níquel, rodeado por una región de menor densidad llamada manto. Estaba envuelta en una atmósfera de vapor y dióxido de carbono. Pese a carecer de agua en la superficie, pudo haber almacenado un gran volumen en su interior y hallarse en la atmósfera en forma de vapor. Los elementos ligeros se transfirieron hacia arriba y los más pesados se asentaron en el suelo. Nacida en Marte, o en otro lugar, llegaría transportada hasta aquí en meteoritos.

A cuatro hipótesis principales puede reducirse un plausible origen de la vida en el contexto global de las condiciones de la Tierra en la era Hadeana: primera, hubo múltiples microambientes que contribuyeron a la construcción de bloques componentes de la vida; segunda, hubo catalizadores minerales que centralizaron redes de reacciones prebióticas que condujeron a un metabolismo moderno; tercera, se requirieron múltiples procesos de transporte local y global, esenciales para concatenar reacciones que ocurrían en lugares diversos; y cuarta, la diversidad global y la selección local de reactivos y productos aportaron mecanismos para la generación de la mayoría de los distintos bloques de construcción necesarios para la vida.

La primera mitad del siglo xviii fue el tiempo en que nació el campo de la geología y se fraguó la escala geológica temporal que conocemos. En esas fechas, se definieron las diversas eras, épocas y períodos. Antes de 1800 se creía que cada tipo de roca pertenecía a una edad específica. Se presumía que las ígneas y metamórficas, el núcleo de todas las montañas y volcanes, eran las rocas más antiguas de la Tierra. Las sedimentarias serían más jóvenes, resultantes de una serie de inundaciones que abarcaron el mundo entero. Este principio, denominado neptunismo, predominó y se desarrolló hasta el punto de que se pensara que determinados tipos de rocas sedimentarias presentaban edades específicas.

Pero en 1805 se produjo un descubrimiento que modificó de plano el estado de la cuestión. William «Strata» Smith observó que no era el orden de tipos lito-

lógicos lo que determinaba su edad, sino el orden de los fósiles en el interior de las propias rocas; ellos podían ser utilizados para fechar y poner en correlación estratos de localidades muy alejadas. Puso de manifiesto que las rocas podían tener edades muy diferentes y que la misma sucesión de tipos de fósiles podía hallarse en distintas regiones. La diferencia en contenido fósil podía emplearse para escalonar una sucesión de rocas donde abundaran fósiles. Hasta el momento, la unidad fosilífera de tiempo más antigua es el Cámbrico, que debe su nombre a una tribu de Gales. Todas las rocas anteriores a esta se clasificaron como precámbricas. Desde el Cámbrico en adelante, las rocas fosilíferas se denominarían fanerozoicas. La era Proterozoica, la postrera antes del advenimiento de los animales, siguió a dos eras anteriores, la arquea y la hadeana. El Fanerozoico se dividió, a su vez, en Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico.

La historia de la vida se ha visto más afectada por episodios de violencia, por catástrofes, que por la suma del resto de las fuerzas, incluida la evolución lenta y gradual defendida por Charles Darwin. El principio guía de la geología a lo largo de más de dos siglos fue el uniformitarismo, establecido por James Hutton y Charles Lyell. El descubrimiento del impacto de un asteroide que mató a los dinosaurios y sacudió a nuestro planeta hace 60 millones de años supuso el abandono de esa doctrina en favor del neocatastrofismo.

Nosotros participamos de una vida fundada en el carbono, cuyos componentes son macromoléculas tejidas con largas cadenas. Pero hubo tres moléculas que existían como gases simples y ejercieron una influencia determinante en la historia de la vida: oxígeno, dióxido de carbono y sulfhídrico. El azufre pudo muy bien haber sido el elemento más importante en la naturaleza e historia de la vida en este planeta. En otro orden, aunque las especies medraron y evolucionaron, debemos a los ecosistemas y su dinámica el ensamblaje de la vida. Pensemos en la importancia crucial de los arrecifes de coral, las selvas tropicales o la fauna de los humeros submarinos.

Hace unos 3800 millones de años, aun cuando hubiera pasado lo peor de la cascada de meteoritos impactantes, persistirían las colisiones violentas. La duración del día no llegaba a las diez horas porque el giro de la Tierra era más rápido. El Sol sería más tenue, un globo rojo quizá de escaso calor, por cuanto no solo producía muchísima menos energía que hoy, sino que tenía que brillar a través de una atmósfera tóxica, compuesta de dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, vapor y metano; no había oxígeno, ni atmosférico ni oceánico. El firmamento aparecía teñido de un naranja o rojo ladrillo, y los mares, que cubrirían la faz de la Tierra, de un marrón limoso.

Uno de los requisitos previos críticos para el origen de la vida sobre la Tierra era que tuviera gases atmosféricos reductores para permitir la formación de moléculas prebióticas. Para la vida en la Tierra, las fuentes primarias de energía proceden de reacciones termonucleares de fusión del Sol. Con mucho, la forma más común en que la vida adquiere energía solar es a través de la fotosíntesis, proceso en el que la luz aporta energía para convertir dióxido de carbono y agua en compuestos de carbono complejos con muchos enlaces químicos que almacenan energía. Con la rotura de estos enlaces se libera energía.

De todas las moléculas que integran la vida en la Tierra, ninguna es más importante que el agua; agua en fase líquida. La vida en nuestro planeta consta de moléculas bañadas en agua. Mientras que el número de moléculas halladas en los organismos es ingente, se reducen a solo cuatro clases los tipos empleados por la vida: lípidos, hidratos de carbono, ácidos nucleicos y proteínas.

A lo largo de más de dos decenios fue incontrovertida la tesis de que el signo más antiguo de vida en la Tierra procedía de un rincón congelado de Groenlandia. En Isua no se descubrieron fósiles. Pero sí se observó que la apatita mineral contenía cantidades microscópicas de dos isótopos diferentes de carbono que mostraban una proporción característica de la vida actual. Las rocas de Isua se fecharon en 3700 millones de años de antigüedad. Una nueva datación acotó la fecha y la cifró en 3850 millones de años. La edad de esas rocas reflejaba que el bombardeo intenso de asteroides había terminado y que la vida podía abrirse camino. Sin embargo, nuevos instrumentos desarrollados ya en el siglo XXI evidenciaron que las pequeñas concentraciones de carbono de las muestras de Isua no habían sido formadas por la vida.

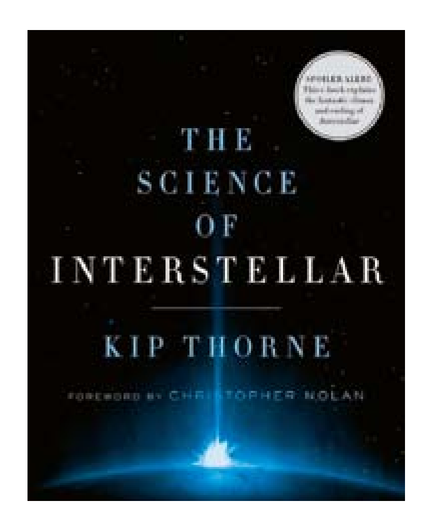
La siguiente muestra de traza de vida más antigua se remonta unos 3500 millones de años. Ahora la declaración se basaba en fósiles, no en señales químicas. En una roca parecida a ágata, William Schopf descubrió ciertas formas filamentosas. Pertenecían a la formación Apex Chert, de Australia. El hallazgo de Schopf mostraba que la vida empezó en nuestro planeta en una fase muy temprana del mismo. Durante una veintena de años esos fósiles fueron aceptados como las formas más antiguas de vida en la Tierra. Pero también la duda se sembró sobre ellos. Martin Brasier, de Oxford, alegó que los así llamados fósiles más antiguos sobre la Tierra eran trazas cristalinas, no reliquias biológicas. Sobre el asunto se desencadenó una enconada polémica. Se llegó incluso a cuestionar la edad de Apex Chert. En 2005, Roger Buick, de la Universidad de Washington, avanzaba que, aunque los objetos de Apex Chert fueran fósiles, las rocas eran mucho más jóvenes de lo que Schopf sostenía. De hecho, más de mil millones de años más jóvenes, lejos de ser la forma de vida más antigua en la Tierra. La hipótesis de Schopf se cuestionó.

Pero en el verano de 2012 firmaba Brasier un artículo en el que demostraba la presencia de vida hace, por lo menos, 3400 millones de años. Se apoyaba en fósiles microscópicos, del tamaño y forma de un tipo especial de bacteria que vive todavía en la Tierra. La forma más antigua de vida medraba en el mar, necesitaba azufre para subsistir y moría prestamente si quedaba expuesta a moléculas de oxígeno. Hoy la vida es una forma basada en el carbono, pero en su origen tuvo al azufre en el centro.

Los fósiles descritos en el artículo de Brasier estaban emparentados con bacterias que persisten en nuestro planeta, bacterias que necesitan azufre elemental para subsistir y mueren cuando se les expone a oxígeno. Los fósiles descubiertos por Brasier proceden de un entorno con temperaturas elevadísimas. Vivieron en un planeta sin continentes, sin tierra firme, salvo cadenas efímeras de islas volcánicas. En ese mundo apareció la vida y pugnó por conservarse. Descendemos de esa cuna y portamos las cicatrices y genes de un origen de la vida abundante en azufre.

A modo de resumen final: hace 4500 millones de años se formó la Tierra; hace 4400 millones de años se estabilizó la hidrosfera; hace entre 4200 y 4000 millones comenzó la química prebiótica; hace unos 4000 millones se creó un mundo pre-ARN; hace 3800 millones apareció el mundo de ARN; hace 3600 millones de años empezó la vida basada en el ADN y las proteínas.

—Luis Alonso



THE SCIENCE OF INTERSTELLAR

Por Kip Thorne (prólogo de Christopher Nolan). W. W. Norton & Company, Nueva York, 2014.

El agujero negro convertido en estrella de cine

Ciencia y ficción en Interstellar

Los admiradores de Einstein y aficionados a su revolucionaria teoría de la gravedad (la teoría general de la relatividad) estamos de enhorabuena este año. A las numerosas actividades, tanto especializadas como de divulgación, motivadas por el centenario de la formulación definitiva de la teoría en noviembre de 1915, se añade la publicación de un magnífico libro dedicado a explicar la abundante ciencia que subyace en *Interstellar*, la taquillera película de 2014 que tiene entre sus estrellas principales ni más ni menos que a un agujero negro, y que incluye secundarios de lujo tales como un agujero de gusano, ondas gravitacionales y un universo con cinco dimensiones.

El autor del libro, Kip Thorne, es un astrofísico y experto en la teoría de la gravedad del Instituto de Tecnología de California (Caltech), jubilado en 2009, que ya tenía experiencia en incorporar la difícil física de la relatividad a la ciencia ficción más exigente: aquella que difiere de la mera ficción fantástica en su decisión de respetar la ciencia que conocemos. En los años ochenta, Thorne había asesorado a su amigo Carl Sagan sobre cómo usar los agujeros de gusano en su novela *Contact*, llevada a la pantalla en 1997 en una película que tiene muchos elementos en común (actor protagonista incluido) con *Interstellar*.

Thorne nos narra la génesis del proyecto de *Interstellar*: en 2005, junto con la productora cinematográfica Lynda Obst, comenzó a jugar con la idea de realizar una película en la que las fascinantes y misteriosas propiedades de los agujeros negros desempeñasen un papel central. Tras muchas vicisitudes, el proyecto acabó en manos de los hermanos Nolan (el director Chris y el guionista Jonah), quienes se comprometieron a mantener el espíritu original de hacer una película en la que la ciencia estuviese presente de principio a fin.

Thorne impuso dos condiciones muy exigentes sobre el guion: primero, que nada en la película debería violar leyes científicas firmemente establecidas; segundo, que las especulaciones sobre leyes no comprendidas del todo deberían al menos tener un hilo de conexión con la ciencia posible. La tensión entre estos requisitos y las necesidades narrativas de la historia es palpable a lo largo de este libro. Tanto la película como la ciencia descrita en el libro tienen un comienzo sólido y prometedor, que progresivamente se hace más irregular y desemboca en un final con bastantes elementos confusos. Buena parte del libro es un intento de dar una interpretación científica honesta y plausible de aquello que en la pantalla solo se describe mediante imágenes o en brevísimas palabras. Creo que el lector se verá tan sorprendido como yo por el nivel de detalle científico implícito en secuencias que duran apenas unos segundos.

Si bien ha habido grandes películas con un tratamiento serio de la ciencia que involucran —desde la genial *2001: Odisea del espacio* hasta la más reciente *Gravity*— creo que *Interstellar* marca un hito en el género por la diversidad y densidad de conceptos científicos y la finura con la que son tratados. No solo cubre una gran variedad de física gravitatoria; Thorne nos habla de una reunión de ocho horas que mantuvo en Caltech con astrobiólogos, planetólogos, físicos teóricos, cosmólogos, psicólogos y un experto en política espacial, con el fin de discutir ideas y objeciones que deberían tenerse en cuenta. Así, cuestiones como la posibilidad de una catastrófica plaga que en unas décadas arruine las cosechas de toda la Tierra, o la geología y condiciones para la existencia y evolución de la vida en los planetas que visitan los astronautas, fueron sometidas a escrutinio con el fin de evaluar su plausibilidad y certificar que, cuando no probables, al menos estuviesen dentro de lo que la ciencia nos dice que no es imposible.

Ese respeto a la ciencia ha hecho que las bellísimas imágenes del agujero de gusano cercano a Saturno, del viaje de los astronautas que lo atraviesan, y de Gargantúa, el gigantesco agujero negro junto al que posteriormente aparecen, hayan sido generadas siguiendo las matemáticas de la teoría de Einstein, recurriendo a mínimas licencias artísticas para su adaptación a la pantalla. No sé de otro caso en el que la preparación de una película comercial haya dado lugar a un artículo publicado en una revista científica especializada («Gravitational lensing by spinning black holes in astrophysics, and in the movie *Interstellar*», por O. James, E. von Tunzelmann, P. Franklin, K. S. Thorne en *Classical and Quantum Gravity*, vol. 32, n.º 6, art. 065001, 2015).

De entre los fenómenos científicos que se detallan en el libro, hay dos con los que disfruto especialmente al explicarlos a los amigos que han visto la película. El primero es esencial para la más potente fuente de tensión en la historia: el tiempo en la vecindad de Gargantúa transcurre a un ritmo mucho más lento que en la nave que queda a cierta distancia de él, o que en la Tierra (se nos dice que una hora en el planeta de Miller equivale a siete años en la Tierra). Por increíble que parezca, este efecto entra dentro de la «ciencia bien establecida» de la película.

Ya en 1959 se verificó experimentalmente que, cuanto más intensa es la gravedad, más lento discurre el tiempo. Un reloj en la planta baja de un edificio se retrasa cada día 200 billonésimas de segundo (200×10^{-12} segundos) respecto a un reloj en la azotea, donde, al estar 20 metros más lejos del centro de la Tierra, la gravedad es (muy levemente) más débil. Desde luego, este resultado es demasiado pequeño para que lo notemos y decidamos mudarnos al sótano con el fin de retrasar nuestro envejecimiento. Sin embargo, el mismo efecto se ha incorporado a nuestras vidas en los últi-

mos años a través de la localización GPS. Esta se basa en la sincronización entre el reloj interno del aparato en nuestro coche y la señal emitida desde satélites que orbitan a 20.000 kilómetros de altura. La diferencia de altitud es ahora tal que el retraso diario es de 40 millonésimas de segundo. Si no se tuviese esto en cuenta, en pocos minutos el error en la localización de nuestro aparato de GPS sería de cientos de metros, lo que lo haría inútil para la conducción. Claramente, en la cercanía del intensísimo campo gravitatorio de un agujero negro el resultado será mucho mayor. Aun así, el lector del libro descubrirá que la magnitud del efecto requerida en la película no es fácil de obtener en las situaciones «realistas» más frecuentes en el universo. De todas maneras, encaja cómodamente dentro de lo admisible por las leyes de la física actual.

El otro fenómeno que me gusta discutir es la ola gigantesca que alcanza a los astronautas poco después de que se hayan posado en la superficie acuática del planeta de Miller. De nuevo, aquí tenemos la magnificación extrema de un efecto familiar. Todos sabemos que las mareas las causa la atracción gravitatoria que la Luna (y, en menor medida, el Sol) ejerce sobre la Tierra y sus océanos. Nos resulta entonces fácil entender que las mareas que un agujero negro produzca en un planeta próximo a él se manifiesten como olas descomunales. Pero hay otro efecto interesante implicado. La gravedad no solo desplaza el agua de los océanos, sino que también actúa sobre la roca del planeta. Al ser más rígida, esta reacciona distorsionándose y fragmentándose. En la Tierra, este efecto es muy pequeño, pero en Ío, la luna más próxima a Júpiter, el resultado es una gran actividad sísmica y volcánica. En el planeta de Miller, la intensa atracción del agujero negro sobre la parte rocosa del planeta da lugar a terremotos que originan enormes tsunamis como el que golpea a los astronautas en la película. De nuevo, la comprensión más completa del fenómeno involucra otros detalles finos que el lector encontrará explicados muy claramente en el libro.

La ciencia de *Interstellar* se vuelve mucho más especulativa en los dos últimos capítulos de esta obra, que coinciden con el desarrollo hacia el clímax de la película a partir del momento en que el astronauta Cooper cae al interior del agujero negro. Aquí Thorne nos introduce en ideas de la física teórica contemporánea (teoría de cuerdas, cosmologías con dimensiones adicionales y universos-brana) que, aunque no estén verificadas experimentalmente, son consistentes con las leyes establecidas y, por tanto, aceptables en la narrativa de ciencia ficción. Pese a que Thorne es un físico teórico muy distinguido y un divulgador avezado, en sus explicaciones se entrevé que estos temas no caen dentro de su especialidad. Esto, unido al carácter alejado de nuestra experiencia de las ideas que se manejan, hace que a partir de este punto el libro resulte más difícil para el lector, que a menudo se ve abocado a «tragar sin digerir» muchas de las ideas que se discuten. Pese a ello, en esto apenas difiere de la mayoría de las publicaciones divulgativas sobre estos temas, y Thorne consigue excitar la imaginación del lector con ideas muy sugerentes.

Thorne nos introduce en ideas de la física teórica que, aunque no estén verificadas experimentalmente, son consistentes con las leyes establecidas

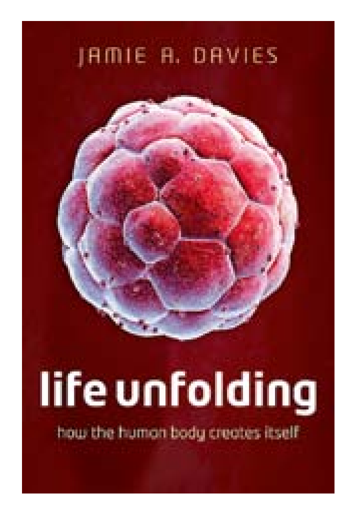
En los tramos finales del libro, la especulación bordea de manera peligrosa el límite de lo que creemos científicamente posible. En particular, la idea de que se puedan enviar señales gravitatorias al pasado (aun a través de una quinta dimensión) es algo que, creo, la mayoría de los físicos teóricos consideramos muy probablemente incorrecta y tal vez contradictoria con la física de nuestro universo. De hecho, he tenido la impresión de percibir entre líneas la incomodidad de Thorne al tener que justificar, por imperativos del guion, algo que él mismo encuentra difícil de defender. Probablemente sea más adecuado —como él mismo sugiere— que, en lugar de verlo como una mancha en una película con aspiraciones de impecabilidad científica, lo tomemos como una licencia al servicio de una buena historia que se mantiene siempre muy por encima del nivel de rigor habitual en el género.

Thorne nos revela muchos otros detalles menores que escaparán a buena parte del público, y en cuyo tratamiento esta película es también singular. Por ejemplo, las ecuaciones que aparecen en las pizarras no son simplemente caricaturas matemáticas (con muchas raíces cuadradas, símbolos de integral, etcétera, dispuestos más o menos al azar), sino que corresponden a ecuaciones genuinas que describen la dinámica de la gravedad y las dimensiones adicionales, sacadas de los cuadernos y artículos de físicos de Caltech. Uno de los momentos privadamente más memorables para algunos de nosotros es aquel en que Murph (Jessica Chastain) comienza a escribir en una pizarra la «acción efectiva de la teoría de cuerdas a bajas energías», correctamente y en toda su gloria.

Por desgracia, este esfuerzo tan loable por no caricaturizar la ciencia corre el riesgo de irse al traste cuando se representa la tarea de los científicos: resulta muy poco creíble, por no decir grotesco, que «la solución» que el profesor Brand (Michael Caine) encontró muchos años atrás para «la ecuación de la gravedad» contenga un error del que solo él, y nadie más, se había percatado. Los científicos geniales indudablemente existen, pero sus descubrimientos siempre han sido asimilados con rapidez y escrutados por colegas extremadamente capaces que pueden detectar sus posibles problemas. Es una pena que Thorne haya consentido que la tan manida como falsa imagen del genio individual con ideas fuera del alcance de los demás mortales aparezca en una película con la ambición y logros de *Interstellar*, y que no se haya preocupado de desmentirla en su libro.

En definitiva, me parece indudable que las virtudes únicas tanto del libro como de la película compensan sobradamente sus defectos e irregularidades, y los convierten en adiciones indispensables a la colección de cualquier buen aficionado a la ciencia moderna y a la más ambiciosa ciencia ficción. Una excelente manera de celebrar el centenario de uno de los mayores logros intelectuales de la humanidad.

—Roberto Emparan
Universidad de Barcelona e Instituto de Ciencias del Cosmos



LIFE UNFOLDING. HOW THE HUMAN BODY CREATES ITSELF

Por Jamie A. Davies. Oxford University Press, Oxford, 2014.

Autoorganización

Desarrollo embrionario

El embrión, producto de la fusión de espermatozoide y óvulo, ha sido objeto de atención desde la antigüedad. Pero fue con la introducción de la fecundación in vitro en 1978 cuando la embriología se situó en el primer plano de la investigación científica. Desde la clonación hasta la controversia sobre la ética y la legalidad de la experimentación sobre células madre o la sustitución de ADN mitocondrial, pasando por la medicina regenerativa, la ciencia de cómo y cuándo empieza la vida humana ejerce hoy una poderosa fascinación.

Aristóteles, en el siglo IV a.C., fue uno de los primeros proponentes de la epigénesis, doctrina que defendía que la conformación de una vida procedía de forma gradual. Biólogo de vocación, observó el desarrollo de los embriones de pollo, desde un comienzo de materia amorfa hasta la eclosión del huevo. Se percató de la vinculación del ciclo menstrual con la reproducción y advirtió que la cópula implicaba la mezcla de fluidos del varón y la mujer. La teoría antagonista, la de la preformación, tuvo momentos de esplendor en los siglos XVII y XVIII. Declaraba que el individuo se hallaba, preformado, en la concepción, en espera de su activación. Las lucubraciones languidecieron con el advenimiento de la microscopía, que permitió a Caspar Friedrich Wolff y a Charles Bonnett seguir las primeras fases del desarrollo. La filosofía cedió el testigo a la ciencia experimental.

Propio del método científico es extraer verdades generales a partir de un número limitado de ejemplos. Recordemos que la observación del curso de unos planetas llevó a Kepler a formular las leyes sobre el movimiento planetario; de ahí pasó Newton a su ley de la gravitación universal. En la estratificación descubierta de unas formaciones rocosas en Escocia apoyó Hutton la primera teoría geológica moderna sobre la Tierra. Las variaciones entre un contado número de especies que había estudiado dieron pie a Darwin para enunciar una teoría de la evolución por selección natural que se aplica a todas las formas de vida. A partir de un número limitado de acontecimientos relacionados con el desarrollo, Davies ofrece aquí un relato exhaustivo de cuanto se sabe sobre el despliegue del cuerpo humano entero a partir un cigoto insignificante.

En el último decenio hemos asistido a una convergencia de disciplinas diversas que han posibilitado la articulación sistemática de la nueva biología del desarrollo. La embriología y neonatología han recabado abundante información anatómica y funcional. La genética y la toxicología identifican causas precisas de anomalías hereditarias que permiten conocer las vías moleculares requeridas en un desarrollo normal. La bioquímica y la biología molecular ahondan en las interacciones entre iones. La biología celular da cuenta de la conjunción de las vías moleculares para tomar el control del comportamiento de la célula. A una escala mucho mayor, la fisiología, la inmunología y la neurobiología descubren las formas en que una muchedumbre de células se comunican y coordinan. Dos términos recurrentes en este contexto son los de emergencia y autoorganización adaptativa. Por emergencia se entiende el proceso en cuya virtud surgen estructuras y conductas complejas a partir de reglas y componentes simples. La autoorganización adaptativa designa la aplicación de reglas sencillas a los componentes para provocar un producto más inteligente y sutil.

¿Cómo es posible que de un óvulo fecundado surja toda la complejidad de un ser humano, con un cerebro de miles de millones de neuronas, una filigrana reticular de capilares sanguíneos, la solidez de los huesos, la dúctil protección de la piel, el sistema eficiente de adquisición de energía o el mantenimiento de los órganos? Acostumbramos a asociar el embrión a un paisaje autocreador, que añade complejidad a la complejidad y en el que la geografía actual depende de la historia del pasado. El de autoorganización constituye el concepto clave. Proteínas expresadas por genes que operan en conjunción con señales físicas y químicas procedentes del entorno promueven que las células se organicen a sí mismas en un cuerpo. A la complejidad mencionada se llega vía redes de señalización, movimientos a gran escala instados por gradientes de concentraciones químicas y ajuste constante en respuesta a procesos retroactivos. El hilo conductor de las fases embrionarias es la comunicación entre células. En cada paso, una maquinaria proteica detecta señales procedentes del entorno celular; señales mecánicas (tensión, superficie libre) o bioquímicas (moléculas procedentes de otros tejidos) que, combinadas con el estado interno preexistente de cada célula, determinarán qué acontecerá después.

La señalización entre células aumenta la complejidad y enmienda los errores. La complejidad remite al número de tipos celulares y estructuras anatómicamente diferentes. Se parte de una complejidad limitada (un tipo de célula, una estructura) para multiplicarse con el tiempo (miles de tipos celulares, miles de estructuras internas). Y lo que reviste mayor interés: durante la fase más activa del desarrollo, el crecimiento en el número de estructuras se hace de manera aproximadamente exponencial, característica de sistemas que legan a sus sucesores una capacidad incrementada. Para hacernos una idea, pensemos en la población de un cultivo bacteriano: la bacteria inicial crece y se divide en dos, cada una de las cuales se desarrolla y se divide, a su vez, para convertirse en cuatro, que pasarán a ocho, dieciséis, etcétera. El crecimiento exponencial en complejidad ejerce un efecto similar. La complejidad alcanzada aumenta la capacidad de un

embrión de agregar más complejidad en la etapa siguiente. Merced a la comunicación celular.

Se evidencia la flexibilidad de la embriogénesis en la forma en que un tejido puede reclamar el desarrollo de otro para su propio beneficio; así, el tejido hipóxico que necesita el suministro sanguíneo o el control de la proliferación de células madre por señales procedentes de tipos celulares que ellas mismas fabrican. En el corazón de esa flexibilidad encontramos bucles de señalización y de realimentación. La presencia de bucles de realimentación confiere a la comunicación intercelular el carácter de una verdadera conversación, señales que son respondidas por otras señales que retornan, en interdependencia constante. No se requiere ningún constructor ni organizador externo. En biología, la estrategia de construcción depende de la naturaleza de los componentes implicados. Con mucho, las moléculas más importantes de la construcción biológica son las proteínas. De ellas están hechas, en su mayoría, las estructuras físicas que dan a las células su conformación, crean canales y bombas que regulan la entrada y salida de la célula y catalizan las reacciones químicas de la vida. Las reacciones abarcan las vías metabólicas que sintetizan ADN, lípidos e hidratos de carbono.

Las proteínas constan de largas cadenas de aminoácidos; en número de veinte, difieren en su morfología y propiedades químicas e interaccionan unos con otros, lo que significa que las cadenas correspondientes se pliegan en configuraciones complejas. Ese proceso de plegamiento es tan peculiar, que resulta imposible todavía inferir matemáticamente la forma final de una proteína a partir del conocimiento de los aminoácidos de su secuencia. Diferentes proteínas tienen distintas secuencias de aminoácidos. A menudo una proteína puede reconocer puntos de enlace solo en otra proteína específica. Aparecen así complejos constituidos por componentes múltiples que acaban integrando una estructura definida. Estos complejos actúan como máquinas que ponen en funcionamiento reacciones químicas complejas y organizan el ensamblaje de estructuras que, por su tamaño y complicación, no podrían hacerlo por sí mismas.

La asociación entre proteínas para formar complejos se basa en la información que portan las propias proteínas, donde información es aquí sinónimo de estructura. A gran escala, las estructuras biológicas varían; su disposición exacta se adapta a las circunstancias (una célula se ajusta al espacio que debe ocupar en el tejido). En los sistemas biológicos, se agregan capas de regulación al autoensamblaje químico para producir sistemas que organizan estructuras adaptadas a la circunstancia y la necesidad. No podemos, por fin, olvidar un aspecto peculiar de la construcción biológica: no puede detenerse y comenzar de nuevo para volver a incoar el proceso de construcción. El desarrollo de un embrión viene condicionado por una restricción: cada estadio del desarrollo debe ser compatible con su persistencia en la vida.

El humano adulto consta de un número astronómico de células, que no se distribuyen al azar, sino que se conectan en patrones muy complejos. Se reparten entre cientos de tipos celulares, dotado cada uno de una estructura y una función. El primer paso significativo en el camino hacia una forma más compleja de ser estriba en la conversión de una célula en multitud de ellas. Escalón necesario, pues cualquier animal complejo requiere realizar muchas cosas diferentes a un mismo tiempo: respirar, digerir alimentos, desintoxicarse de sustancias dañinas, crecer el pelo, formar nuevas células dérmicas, filtrar la sangre, regular la temperatura, oír, etcétera. Esas y otras actividades no mencionadas emplean distintos grupos de proteínas y vías bioquímicas.

En biología, la estrategia de construcción depende de la naturaleza de los componentes implicados

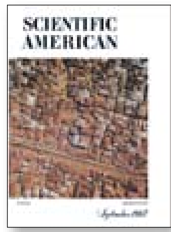
Muchas funciones serían incompatibles si se realizaran en el mismo sitio. Los organismos complejos acuden a la compartimentación, aplicando el principio de la separación de cada actividad en su sitio específico. Los cuerpos se dividen en órganos que realizan tareas distintas. Los órganos se dividen, a su vez, en tejidos que abordan funciones diversas. Los tejidos se dividen en células; diferentes tipos de células cumplen distinta misión. En el interior de cada célula, la mayoría de las moléculas pueden moverse con plena libertad. Existen también compartimentos intracelulares, que desempeñan su propia misión. Ello no obsta para que consideremos la célula como unidad fundamental que realiza una o dos funciones a la vez. De ahí la importancia de contar con una multiplicidad de células diferentes como paso imprescindible para crear un cuerpo complejo.

El huevo fecundado con el que empieza el desarrollo humano es insólitamente grande, de una décima de milímetro de diámetro y visible. La mayoría de las células del cuerpo maduro son mucho menores, de una centésima de milímetro de diámetro y una milésima del volumen del óvulo. Fecundado, puede generar un embrión multicelular por simple división primero en dos, luego en cuatro, luego en ocho, etcétera, sin necesidad de interrumpir el desarrollo. La división de una célula en dos implica compartir todas las moléculas internas (proteínas, por ejemplo) con las células hijas. Con la excepción del ADN: la célula indivisa consta de 46 cromosomas (23 del padre y 23 de la madre); cada una de las células hijas necesita también 46 cromosomas, lo que requiere que se repliquen antes de que empiece cada tanda de división celular. Y lo que es más, ha de haber un sistema que asegure que los cromosomas replicados se alojen equitativamente en las células hijas.

Para la división celular, resulta obligado definir los lugares que se convertirán en centros de las dos células hijas, de suerte que los cromosomas pueden alojarse en su sitio adecuado. En ese paso se requieren dos centrosomas, suerte de nubes de proteínas en torno a sendas estructuras portadoras de tubulina. En cuanto se ha terminado la primera división celular, cada una de las dos células comienza a copiar sus cromosomas y a dividirse. En cuanto el embrión alcanza la fase de 16 células, posee capacidad suficiente para organizar su propia forma. Empiezan las células a diferenciarse entre sí y arranca el desarrollo embrionario. El desarrollo celular requiere suministro de nutrientes para acometerlo. Lo que exige la especialización de determinadas células en esa misión. La especialización celular supone la pérdida de homogeneidad; en adelante, unas células se encargarán de una función y otras de otra. Lo que comporta un nuevo orden y una nueva información.

—Luis Alonso

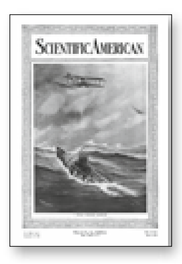
Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Septiembre 1965

El auge de las ciudades

«Las sociedades urbanas, en las que una gran parte de la población se agrupa en grandes núcleos, representan una fase nueva y fundamental en la evolución social humana. Aunque las que hoy consideramos ciudades aparecieron hará unos 5500 años, en ese tiempo constituían núcleos reducidos rodeados de una abrumadora mayoría de población rural; además, retornaban con facilidad a su situación previa de pueblo o aldea. En cambio, las sociedades urbanas actuales no solo forman conglomerados de unas dimensiones sin precedentes, sino que en ellas se concentra una parte considerable de los habitantes. Todavía no se ha apreciado la novedad y la rapidez de tan revolucionario desarrollo. Antes de 1850, ninguna sociedad podía describirse como predominantemente urbana, y, hacia 1900, solo una (Gran Bretaña) podía considerarse como tal. Hoy, solo 65 años después, todas las sociedades industriales son fundamentalmente urbanas.»



Septiembre 1915

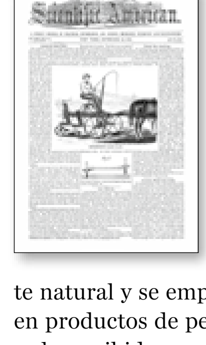
Guerra y fauna

«En toda Europa la guerra está teniendo una gran influencia en las aves, especialmente en las migratorias. Estas se observaron en lugares donde antes nunca habían sido vistas, y se notó su falta en los escenarios donde atronaron las batallas. En Luxemburgo, en cuyos frondosos bosques se congregaban, en otras circunstancias, millones de pájaros, ahora apenas se ve o se oye alguno. Desde allí un amante de la naturaleza escribe que "por los caminos y en las plazas de los mercados de pequeños pueblos y aldeas donde los caballos se alimentaban cuando pasaban las tropas han brotado campos de avena enteros". Ello no habría sido posible otros años, pues entonces las aves habrían dado cuenta inmediata de todo grano caído al suelo.»

Frente al mar

«En dos ocasiones, desde que se construyó hace trece años, ha soportado el malecón del muelle de Galveston los embates de un mar embravecido por un huracán, y en ambos casos el rompeolas resistió perfectamente. En la última tempestad los daños en la ciudad se concentraron principalmente en la zona financiera, donde nunca se ejecutó el plan de elevación de rasantes. A petición del Consejo de Comisionados Municipales del Condado de Galveston, el autor inspeccionó la obra inmediatamente después de las dos grandes tempestades de 1909 y 1915, y en ningún caso halló el menor daño en el rompeolas, pese a que lo habían rebasado pesados maderos y troncos que habían causado graves desperfectos en el bulevar. —Brigadier General Henry M. Robert»

El autor escribió también las Reglas de procedimiento parlamentario de Robert, *publicadas por primera vez en 1876.*



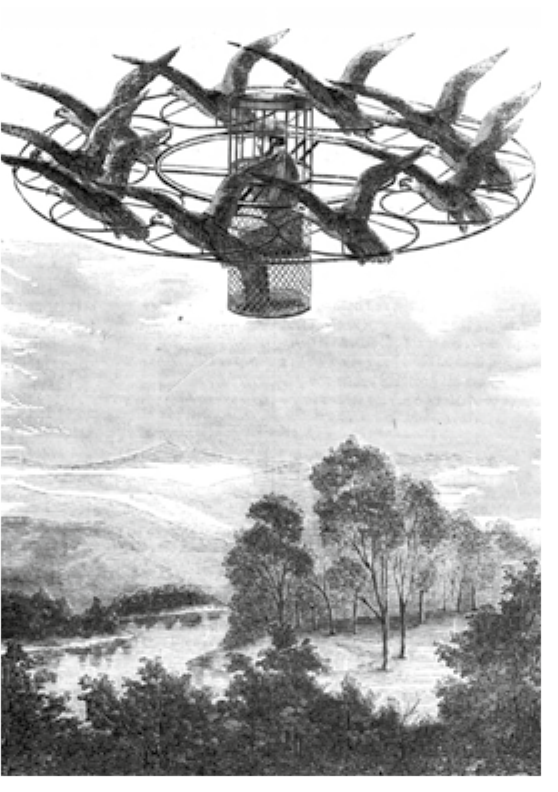
Septiembre 1865

Nitroglicerina para voladuras

«Como es sabido, la glicerina es la esencia dulce del aceite natural y se emplea abundantemente en productos de perfumería, pero ahora ha recibido una aplicación de carácter más bien insólito. En 1847, Ascanio Sobrero descubrió que la glicerina tratada con ácido nítrico se convertía en una sustancia altamente explosiva que él llamó nitroglicerina. Es un líquido aceitoso y más denso que el agua, soluble en alcohol y éter. Actúa tan poderosamente sobre el sistema nervioso que una sola gota depositada en la punta de la lengua causa un violento dolor de cabeza que dura varias horas. Es un líquido que parece haber sido olvidado casi del todo por los químicos, y solo ahora el señor Nable [sic —Alfred Nobel], ingeniero sueco, ha logrado aplicarlo con éxito a un importante aspecto de su oficio: las voladuras.»

Idea brillante

«Sres. de la redacción: Me atrevo a presentarles un plan, para mí evidentemente sencillo y factible, pero que nunca he sometido a una prueba práctica. Se trata de hacer algo que los humanos ya hacemos en la tierra: aprovechar las fuerzas de los animales inferiores para que nos ayuden a lograr nuestros fines. Hay numerosas aves notables por el vigor de sus alas y su resistencia durante el vuelo. El águila parda y el cisne americano constituyen ejemplos obvios. Mi propuesta es reunir un número de esas aves y ligarlas, mediante chalecos ajustados a sus cuerpos y cordajes, a un armazón que sostenga una cesta de tamaño suficiente para albergar a un hombre.»



EL SUEÑO DE VOLAR: Un imaginativo plan para liberarse de las penosas ataduras a la tierra, 1865.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XIII, N.º 13 (NUEVA SERIE), 23 DE SEPTIEMBRE DE 1865

EVOLUCIÓN HUMANA

La especie más invasora

Curtis W. Marean

Numerosas especies humanas han habitado la Tierra, pero solo la nuestra ha colonizado el planeta entero. ¿Cómo lo ha logrado?



NEUROCIENCIA

Pérdida auditiva oculta

M. Charles Liberman

Los martillos neumáticos, los conciertos y otras fuentes de ruido cotidianas pueden causar daños irreversibles en el oído de un modo inesperado.

MATEMÁTICAS

Construcción de una geometría aleatoria en la esfera

Nicolas Curien y Jean-François Le Gall

Los grafos brownianos, uno de los últimos logros de los matemáticos, abren las puertas a una nueva área de investigación.



EDUCACIÓN

La educación científica del futuro: retos y propuestas

Neus Sanmartí e Iván Marchán Carvajal

¿Se ha de enseñar hoy la misma ciencia y de la misma forma que nos enseñaron a nosotros?

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes y Del lobo al perro*; Alberto Ramos: *Una diferencia de masas trascendental y El gran catálogo universal*; Yago Ascasibar: *Materia oscura compleja*; Guzmán Sánchez: *Toxinas vegetales saludables para el cerebro*; Luis Cardona: *Vida bajo el hielo antártico*; José Óscar Hernández Sendín: *Placas solares de perovskita*; Alfredo Marcos: *Aleatoriedad y mecánica cuántica*; Jacobo Chamorro: *Nuestros relojes internos*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física y Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España